This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

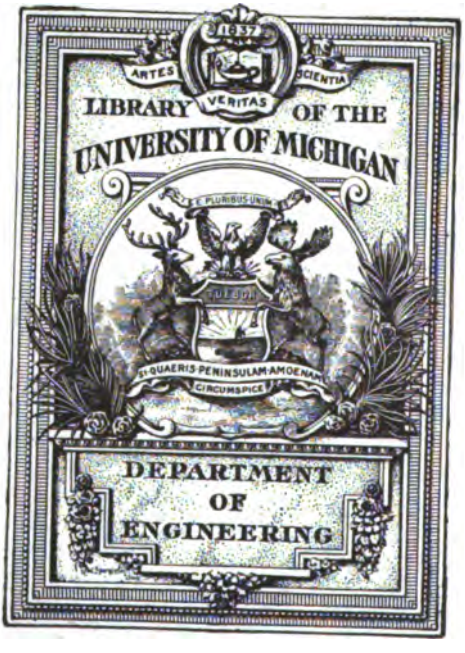
+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

B 465763


ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING

Engin. Library
TH
1141
.H89

Der Drehstrom

seine Erzeugung und Anwendung in der Praxis.

Die

einfachen und mehrphasigen elektrischen Wechselströme,

beziehungsweise:

3-9406

Der Drehstrom

seine Erzeugung und Anwendung in der Praxis.

Gemeinfasslich dargestellt

von

Josef Krämer,
Ingenieur.

Mit circa 300 Abbildungen im Text und 9 Tafeln.

Jena,
Hermann Costenoble.
1896.

**Alle Rechte nach dem Gesetze vom 11. Juni 1870,
insbesondere das Recht der Übersetzung in fremde Sprachen,
vorbehalten.**

Vorwort.

Die grofsen elektrischen Centralstationen, welche in jüngster Zeit nach dem Drehstrom-System eingerichtet worden sind, haben nicht nur die Aufmerksamkeit der technischen, sondern auch weiterer Kreise auf diese neue Art der Elektrizitätsausnutzung gelenkt.

Das Verlangen nach einem Buche, aus welchem man sich über die Entwickelung und über die in der Praxis angewendeten Konstruktions-Prinzipien dieses interessanten Systems ausreichend informieren kann, wurde infolgedessen immer lebhafter; denn obwohl die Resultate der Arbeiten auf diesem neuen Gebiete ziemlich gewissenhaft veröffentlicht wurden, so sind doch diese Verlautbarungen in den verschiedenen Fachzeitschriften (besonders in den amerikanischen) so vielfach zerstreut, dafs es bedeutender Arbeit bedurfte, dieselben zu einem geschlossenen Ganzen zu vereinigen. Überblickt man aber das so erhaltene Material, dann wird klar, dafs zum Zwecke der zusammengefafsten Veröffentlichung eine scharfe Scheidung des zur Belehrung Nötigen und des erst in zweiter Reihe Wissenswerten erforderlich ist. Im vorliegenden Buche wurde nur das Nötige und vom übrigen Materiale nur die zu Vergleichszwecken geeigneten Typen aufgenommen, um das Werk nicht allzu umfangreich zu gestalten und den eigentlichen Zweck, einen Überblick zu ermöglichen, nicht zu gefährden.

Selbstverständlich mufste beim Verfassen dieses Buches ein gewisses Maafs elektrotechnischer Kenntnisse vorausgesetzt werden. Es wurde demnach angenommen, dafs dem Leser die Prinzipien

des elektrischen Gleichstromes bekannt sind, und es wird empfohlen vor dem Studium dieses Buches eine mehr oder minder gründliche Rekapitulation der Prinzipien des einfachen Wechselstromes nach Prof. Kittler's trefflichem Handbuch der Elektrotechnik (II. Band) und dem übersichtlichen Werke von Gisbert Kapp „Elektrische Wechselströme“ (deutsch von H. Kaufmann) vorzunehmen, wenn dem Leser diese beiden Werke nicht ohnehin ausreichend bekannt sein sollten.

Jede Abhandlung über den Drehstrom mufs wohl mit einem Hinweis auf den einphasigen Wechselstrom beginnen. Das ist auch hier in Kurzem geschehen. Nun ist es aber eine schwierige und undankbare Aufgabe, die Wechselstrom-Probleme ohne jede Anwendung höherer Rechnung, also gemeinverständlich zu behandeln. Es wurden daher in der I. Abteilung dieses Buches die Grundzüge der Wechselstrom-Theorie mit dem schweren Rüstzeug der Analysis behandelt, dabei aber auch ein Kapitel über die in neuerer Zeit so sehr beliebte und verhältnismäfsig leicht ausführbare graphische Darstellung von Abhängigkeitsverhältnissen für jene eingefügt, welchen die Anwendung der höheren Rechnung nicht mehr geläufig ist. Von der II. Abteilung an gilt für den grofs gedruckten Text durchaus die im Titelblatt aufgenommene Bezeichnung: „gemeinverständlich“.

Es erübrigt mir nur noch, Herrn Dr. Heinrich Hartmann für das Lesen des mathematischen Teiles und Herrn Dr. Hans Hederich für das Lesen der Korrekturen der zwei ersten Abteilungen auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank auszusprechen. Ebenso bin ich Herrn Dr. Max Rosenkranz für seine Hinweise auf viele interessante Quellen und für seine sachverständige Hilfe bei der Auswahl des Materiales zu vielem Dank verpflichtet.

Berlin, im Dezember 1895.

J. Krämer.

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Vorwort VI

Einleitung 1

I. Abteilung.

Die Magneto-Induktion. Einheit der E. M. K. — Spannung. — Strom-Richtung. — Quantität der Induktionsströme. — Der Sinussatz. — Die Wechselstrom-Maschinen von Siemens, Pixii & Clarke und die Alliance. — Selbstinduktion 7

(Anhang unterm Strich.

Theoretische Bemerkungen über Wechselströme. — Die Volta-induktion. — Das Neumann'sche Doppelintegral. — Das elektrodynamische Potential. — Die Dauer der Induktionsströme. — Elektricitätsmengen) 8

Graphische Darstellung der Wechselstrom-Probleme.

Uhrzeigerdiagramm. — Wellendiagramm. — Polardiagramm 20

Weitere theoretische Betrachtungen.

Die Energie-Gleichung. — Impressed elektro-motive force. — Die Helmholtz'sche Zeitkonstante der Selbstinduktion 26

Die effektive elektrom. Kraft. — Die Phasenverschiebung. — Impedanz — Induktanz — Resistanz. — Die Bedeutung der Mittelwerte. — Scheinbare Watt. — Wirkliche Watt. — Der wattlose Strom. — Der Erregerstrom. — Das arithmetische Mittel. — Das geometrische Mittel. — Die effektive E. M. K. (Praktische Formel von G. Kapp) . 30

Konstruktion der Wechselstrom-Maschinen.

Die Gleichstrom-Dynamo als Wechselstrom-Maschine. — Die Wechselstrom-Maschinen von „Mordey" und von „Kapp" 39

Konstruktion der Wechselstrom-Motoren.

Einteilung nach Hospitalier. — Motoren mit a. konstantem b. oscillierendem Felde. — Die elektrodynamischen Motoren 46

Motoren von „F. J. Patten" — von der Firma „Helios" — von der Firma „Oerlikon" 49

Der Synchronismus beim Wechselstrom-Betrieb.

Die Maschinen von „Hutin & Leblanc". — Kontrolle des Synchronismus nach „Schuckert". — Die Riemen-Einschaltung von „Oerlikon" . . 65

Summieren der Wechselströme.

Die Resultierende. — Die Resultierende des wattlosen und des Wattstromes. — Das Aufsertrittfallen. — Mittel dagegen nach dem Verfahren der A. E. G. 74

Seite

II. Abteilung.

Das magnetische Drehfeld.

A. Drehfeld mit zweiphasigem Wechselstrom.

Geometrische Erläuterung des Drehfeldes von Ferraris 79
Beispiel am elliptisch und kreisförmig polarisierenden Licht. — Drehstrom-Experimente des Ferraris. — Ein Irrtum des Ferraris bezl. des Wirkungsgrades. — Magnetische Pulsationen im zweiphasigen Drehfeld. — Begründung des Ausdruckes „Drehstrom". — Verwendung von Mehrphasen-Strömen nach „Zipernowsky und Deri". — Die Erfindungen von „Bradley", — und von „Tesla" betreffs der Zweiphasen-Ströme . 81

Kunstphase.

Erzeugung derselben nach „Ferraris", — nach anderen Konstrukteuren; — besonders nach dem Patente „Zipernowsky" und „Deri" No. 53416. — Erzeugung von Drehfeldern nach „Wahlström" 110

B. Drehfeld mit dreiphasigem Wechselstrom.

Die Erfindungen von „Dobrowolsky", — von „Haselwander" — und „Wenström". — Die Gleichstrom-Maschine als dreiphasige Drehstrom-Dynamo. — Die Arbeiten „Bradley's" und „Schallenbergers". — Rechnerische Darstellung des Wertes der Intensität des Feldes. — Bildliche Darstellung des Wertes der Intensität dreier sinusoidaler Wechselströme. — Messungen im Drehfeld. — Ausbildung des Dreiphasen-Systems bei der A. E.-G. — Ausführungen Dobrowolsky's über den Stand der Drehfeld-Konstruktionen im Jahre 1891. — Die Konstruktionen von Haselwander 125

III. Abteilung.

Drehstrom-Dynamos.

Dynamos für zweiphasigen Drehstrom. — Konstruktion „Schuckert". — Konstruktion der „Westinghouse-Comp." 156
Dynamos für dreiphasigen Drehstrom. 160
Verkettungen u. zw.: 1. Sternschaltung. 2. Dreieckschaltung. — Spannungs- und Strom-Verhältnisse. — Dreiphasendynamo der „A. E. G." — Die neuesten Konstruktionen der „A. E. G." — Wirkungsgrad derselben. — Charakteristik. — Parallelschaltung solcher Maschinen. — Dreiphasendynamo der Fabrik „Oerlikon". — Die Lauffener Maschine. — Die neuesten Maschinen von „Oerlikon". — Die Dreiphasen-Dynamo von „Siemens & Halske". — Die Dreiphasen-Dynamo von „Schuckert". — Verschiedene Konstruktionen: 1. von Houtin & Maurice Leblanc, 2. von Sohlmann, 3. der Berliner Maschinenbau-A.-G. vorm. Schwarzkopff, 4. von Dickmann und 5. von Oerlikon 161

IV. Abteilung.

Drehstrom-Motoren.

Die Mängel der einfachen Wechselstrom-Motoren. — Einleitung. — Einfacher Wechselstrom-Motor. — Konstruktion Brown. — Tesla's Drehstrom-Motoren (zweiphasig). — Darstellung der verschiedenen

Seite

Phasen einer Tesla-Anordnung. — Das Feld. — Der Anker. — Polzahl. — Die Schlüpfung. — Wirkungsweise der Drehstrom-Motoren. — Drehungsrichtung. — Tourenzahl. — Anordnung von Siemens & Halske. — Zweiphasige Drehstrom-Motoren, Type Bradley, Konstruktion Schuckert. — Spannungs-Diagramm. — Erkennungszeichen für synchronen Gang. — Konstruktion Westinghouse. — Konstruktion Stanley. — Dobrowolskys Drehstrom-Motoren (dreiphasig). — Der patentierte Kurzschluss-Anker der A. E. G. 211

Die Anker von Lahmeyer. — Die Drehstrom-Motoren der „A. E.-G." — Verhältnifs: Tourenzahl, Wechselzahl, Polzahl. — Messresultate von Oerlikon. — Die Drehstrom-Motoren von Siemens & Halske. — Verschiedene Konstruktionen: 1. von Rotten, 2. von Helios. — Diagramme über Strom, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor. — Gegenseitiger Einfluss von Generator und Motor auf die Kurvenform 211

Anhang zur Abth. IV. Theorie der Drehstrom-Motoren. 1. Nach Prof. Dr. Schilling. — Einleitung. — Das Drehungsmoment. — Die geleistete Arbeit. — Wärme in den Ankerwindungen. — Der Wirkungsgrad. — 2. Nach Prof. Arnold 261

V. Abteilung.

Regelung der Zugkraft und Geschwindigkeit bei Drehstrom-Motoren.

Einleitung. — Regelung nach Dr. Krebs, — nach Rotten. — Ausgleicher von „Siemens & Halske." — Ankerschaltungen von „Oerlikon". — Anlassvorrichtung der „A. E.-G." — Verringerung der Umdrehungszahlen und Kaskaden-Schaltung von Siemens & Halske 272

VI. Abteilung.

Transformatoren.

Litteraturnachweis. — Transformation des Drehstroms. — Transformatoren für zweiphasige Wechselströme von Schuckert. — Dreiphasige A. E.-G. Transformatoren. — Kurven des Wirkungsgrades. — Teilung der Spannung. — Vorgänge im dreiteiligen Transformator 291

VII. Abteilung.

Schaltungen und Leitungen.

Schaltungen beim dreiphasigen Drehstrom. — Sternschaltung. Dreieckschaltung. — Sternschaltung mit Null-Leitung. — Spannungs-Verhältnisse. — Leistungen in Drehstrom-Anlagen. — Scheinbare Volt und Ampère. — Scheinbare Watt. — Wirkliche Watt. — Hauptspannung. — Phasenspannung. — Zweiphasenstrom mit gemeinsamer Rückleitung („Schallenberger"). — Dreiphasenstrom mit Null-Leitung A. E.-G. — Dazu gehöriger Spannungsausgleicher. — Der Leitungsquerschnitt. — Materialersparnis beim Dreiphasen-System. — Praktische Berechnung einer Leitung zur Kraftübertragung von 100 P.S. — Der Spannungs-Abfall 301

Seite

Der induktive Spannungsabfall. — Änderung desselben durch Querschnitts-Veränderung. — Verhältnis der Kupfergewichte in den Leitungen. — Graphische Darstellung einer Arbeitsübertragung nach Rotten. — Projektierung von Drehstrom-Anlagen. — Schema einer Dreiphasenstrom-Anlage. — Schema einer verschiedenseitig ausgenutzten Zweiphasenstrom-Anlage. — Drehstromkraftanlage in einer Zementfabrik. — Parallelschalten von Dynamos. — Phasenlampen. — Abstellen einer parallelgeschalteten Dynamo. — Wirtschaftlichkeit einphasiger und mehrphasiger Ströme. — Zusammenstellung der Vorzüge von Drehstromanlagen 321

VIII. Abteilung.

Über das Messen der Wechselströme.

Die dem Wechselstrome eigentümlichen, zu messenden Gröfsen. — (E_{max}, E_{eff}, $M(E)$ (= mittlere elektromotorische Kraft) und $M(E^2)$. — Verwendung des Elektrodynamometers von Siemens und von Ganz. — Die elektrodynamische Wage von Sir W. Thomson (Lord Kelvin). — Das Voltmeter von Cardew. — Energiemessungen. — Kalorimeter. — Phasenmeter von Dobrowolsky. — Diagramm: Wattstrom, Leitungsstrom, (wattloser oder) Leerstrom, Winkel φ. — Erregerstrom, Ladestrom, Korrektionsstrom. — Die alte und die neue Konstruktion der Dobrowolskyschen Phasenmeter (oder Leerstrommesser). — Disposition einer Wechselstromzentrale. — Messen der Energie mit einem, mit drei, mit zwei Dynamometern. — Elektrizitätszähler für Drehstromanlagen 340

Anhang.

Drehstromsystem von H. Kratzert. — Drehstromsystem von C. L. Imhoff. Monocyclic-System. — Kombination des Zwei- und Dreiphasen-Strom-Systems nach Ch. F. Scott. — Die auf letzteres bezogene Anwendung von Transformatoren. — Glühlampen für Dreiphasen-Drehstrom von Siemens & Halske. — Dreiphasiger Wechselstrom zur elektrischen Fernübertragung von Zeigerstellungen von L. Weber 365

Zusammenstellungen und Tabellen.

Zusammenstellung der bei Wechsel- und Drehstrom vorkommenden besonderen Beziehungen und Bezeichnungen 378
Zusammenstellung der beschriebenen Konstruktionen für Wechselstrom . 380
Tabelle I. Die verschiedenen Maschinen-Konstruktionen 382
„ II. Drehstrom-Dynamo-Maschinen der „A. E.-G." 383
„ III. Drehstrom-Motoren der „A. E.-G." 384
„ IV. Ein- u. Mehrphasen-Wechselstrom-Maschinen von „Schuckert" 385
„ V. Dreiphasen-Generatoren (Niedere Spannung) } der Fabrik 386
„ VI. „ „ (Hohe „) } „Oerlikon" 387
„ VII. Drehstrom-Motoren der Fabrik „Oerlikon" 388
„ VIII. Zusammenstellung der elektrotechnischen Maafseinheiten . . 389
„ IX. Zusammenstellung der beim Wechelstrombetrieb vorkommenden Beziehungen und Konstanten 392

Einleitung.

Das „elektrische Drehstrom-System“ und die dazu gehörigen Maschinen und Apparate sind eine Erfindung der neuesten Zeit. Sehr häufig wird jetzt betont und darauf hingewiesen, wie reich gerade unser, nunmehr zu Ende gehendes Jahrhundert an Erfindungen ist; ja man versteigt sich sogar nicht selten zu der Behauptung, dafs wir im „Jahrhundert der Erfindungen“ leben. Wie wenig aber eine solche Bezeichnung begründet ist, soll sofort bewiesen werden.

Wenn wir einmal, sehr entgegen der Gepflogenheit des Maschinentechnikers, der ein Mann der Gegenwart, vielleicht jener der Zukunft ist, auf kurze Zeit den Blick nach rückwärts wenden und das gesamte Gebiet der Erfindungen überblicken, dann wird der Stolz, mit welchem wir unsere Errungenschaften freudig betrachten, doch etwas gemäfsigt; denn bei genauerer Überlegung mufs wohl zugestanden werden, dafs wir eigentlich nur die Vorarbeiten früherer Generationen ausnutzen. Wir können uns höchstens das berechtigte Zeugnis ausstellen, dafs es die jetzige Generation besser versteht, jene von den Vorfahren zumeist aus reinem Interesse an der Wissenschaft vorgenommenen Experimente im Geiste der nach materiellem Gewinne strebenden Richtung der Jetztzeit, als Grundlage zu praktisch verwendbaren Maschinen auszubilden. Nicht allzu weit brauchen wir zurück zu blicken und es ist gar nicht nötig, über jene bedeutsamen Erfindungen nachzugrübeln, welche das Geschöpf „Homo“ zum „Homo sapiens“ heranbildeten; es ist ferner überflüssig (und würde hier auch zu weit führen) Untersuchungen anzustellen,

was für sinnreiche Maschinen erfunden wurden, um die massiven Steinbauten Ägyptens und Indiens aufführen zu können. Die alten Bewohner dieser Länder haben sicherlich die technische Mechanik und auch die theoretische Mathematik zu hoher Ausbildung gebracht; dafür liegen vielfache, beweisende Anhaltspunkte vor. Die Erfindungen des Webstuhles, des Glases, der ersten Metallbearbeitungsmethoden, des Buchdruckes u. s. f., sind Errungenschaften, welche unser Können weit in den Schatten stellen.

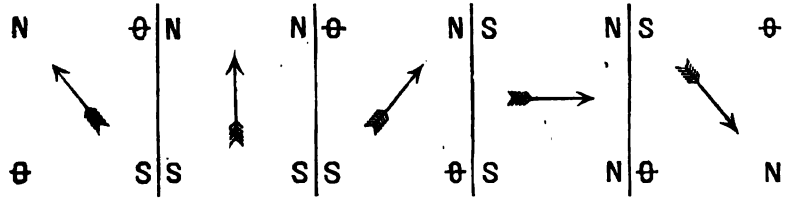
Es genügt, wenn wir die Erfindungen auf rein technisch-mechanischem Gebiete aus dem vorigen Jahrhundert betrachten, um ohne weiteres eingestehen zu müssen, dafs auch den Erfindern jener Zeit enorme geistige Fähigkeiten zur Verfügung standen und dafs nur die ungünstigen politischen und staatswirtschaftlichen Verhältnisse Schuld trugen, wenn diese Fähigkeiten nicht in andere Bahnen gelenkt wurden, so dafs sie der Allgemeinheit jenen Nutzen gebracht hätten, den wir heutzutage von der Erfinderthätigkeit erwarten und verlangen.

Im vorigen Jahrhundert konstruierte Vaucanson einen automatischen Flötenspieler; der ältere Droz einen schreibenden Knaben, der noch zu Anfang und in der Mitte unseres Jahrhunderts als hochinteressante Sehenswürdigkeit gezeigt wurde; der jüngere Droz baute eine automatische Klavierspielerin, bei welcher die Hände und Augen in korrekter Wechselwirkung funktionierten und die nach Beendigung des Spieles aufstand und eine graziöse Verbeugung machte.

In unserer schnelllebenden und schnelldenkenden Zeit ist es fast unmöglich zu erfassen, wie viel geistige Arbeit nötig war, um so komplizierte Mechanismen zu erdenken und welche Summe mechanischer Arbeit aufgewendet werden mufste, um bei den unvollkommenen Hilfsmitteln jener Zeit so umfangreiche und verwickelte Räderwerke anzufertigen. Wir dürfen ferner nicht vergessen, dafs in jener Zeit die besten geistigen Arbeiter zur Lösung unsinniger Probleme (Goldfabrikation, Suchen des Steines der Weisen, Konstruktion des Perpetuum mobile etc.) in Anspruch genommen wurden, und dafs bei diesem Hasten nach unerreichbaren Zielen doch manche Erfindung gemacht worden ist, die uns heute noch mit Staunen und Bewunderung erfüllen

müfste, wenn wir uns bemühen wollten, in den Geist jener Zeiten mehr einzudringen.

Das „Drehstrom-System", von dem wir eigentlich erst seit dem Jahre 1888 sprechen, hat ebenfalls Grundlagen und Beziehungen in den Arbeiten hervorragender Männer der Vergangenheit. Das bekannte „Experiment von Arago" lehrt uns, dafs wir auf eine freihängende Magnetnadel ein Drehmoment auszuüben im stande sind, wenn wir unter oder über derselben eine Kupferscheibe drehen, wobei eine zwischen beiden befindliche Glasscheibe den gegenseitigen Einfluſs der bewegten Luft verhindert (1820), und dafs es ebenso möglich ist, eine Kupferscheibe in Drehung zu versetzen, wenn wir einen permanenten Magneten derart bewegen, dafs seine magnetische Achse in einer zur Kupferscheibe parallelen Ebene rotiert. Ein anderes Experiment, mittels Magnetismus Rotation zu erzeugen, stammt von Walter Baily, welcher am 28. Juni 1879 in der Physical Society of London einen Vortrag über diesen Gegenstand hielt[1]). Baily hatte hierzu den in folgendem beschriebenen Apparat konstruiert: Er stellte vier einspulige, gerade Elektromagnete senkrecht im Viereck auf und liefs über den Polen eine Kupferscheibe (ca. 6 cm Durchmesser) freibeweglich schweben. Diese Elektromagnete waren 10 cm hoch, hatten 150 Windungen aus 2,5 mm starkem Kupferdraht. Die Spulen waren paarweise in Reihe geschaltet. Mittels eines Handkommutators sandte er elektrische Ströme derart abwechselnd in die Elektromagnetspulen, dafs Pole erregt wurden, wie es die nachstehende Skizze zeigt:



u. s. w.

Mit den Wechseln der Pole machte nun die Kupferscheibe Drehbewegungen im Sinne der Pfeile. Erfolgte der Polwechsel mit genügender Schnelligkeit, so kam die auf einer Spitze

[1]) „A Mode of Producing Arago's Rotations".

schwebende Scheibe in vollständige Rotation. Wenn auch Baily diesen Apparat bescheiden nur eine physikalische Spielerei nennt, so meint er andererseits doch, dafs man eine ausnützbare Rotation der Scheiben erreichen könnte, wenn es gelingen würde, eine bequemere Art der Drehung des magnetischen Feldes zu finden.

Ein Jahr darauf (1880) übergab Marzel Deprez der Société Française de Physique die Beschreibung eines Experiments, bei welcher er schon zwei in der Phase verschobene Wechselströme erzeugt und ausnützt. Die Entsendung solcher Ströme erfolgt mittels eines Handkommutators; dieselben werden zu zwei Elektromagneten geführt, von denen jeder zwischen den Polen eines permanenten Hufeisen-Magneten gelagert ist. Letztere stehen sich mit den gleichen Polen gegenüber und die Elektromagnete sind auf einer gemeinschaftlichen Welle befestigt, deren Achse mit der magnetischen Achse beider zusammenfällt.

Es ist klar, dafs bei passender Kommutierung der Ströme eine Rotation der Elektromagnete erreicht werden könnte; es ist jedoch nicht bekannt geworden, ob dieser Apparat ausgeführt wurde, oder ob er eine der vielen guten, aber nicht realisierten Ideeen blieb, gegen deren Ausführung sich die Männer der Praxis vorerst ablehnend verhalten, weil sie blofs das Ergebnis tiefsinniger, dennoch aber, wie sich hinterher zeigt, glücklicher Spekulationen bilden.

Auch Gramme erzeugte zu jener Zeit in seiner Wechselstrommaschine Ströme, die in vier Abständen zu zirkulieren anfingen und in diesen Abständen bezüglich ihrer Maximal- und Nullwerthe verblieben, eine Idee, die später — wie wir sehen werden — vielfach ausgenutzt worden ist.

Es mögen ja vielleicht noch mehrere und andere Ideeen aufgetaucht sein, welche wohl geeignet gewesen wären, die Ausbildung des Drehstrom-Systemes zu fördern; greifbare Gestalt erhielt letzteres aber erst durch die Arbeiten des Prof. Ferraris in Turin und der Amerikaner Bradley und Tesla, welche in verschiedener Weise Wechselströme zur Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes verwendeten. Tesla war wohl der erste, welcher zwei in der Phase um 90° verschobene Wechselströme ausnützte, doch wurden bei allen diesen Arbeiten für jeden Strom unabhängige Stromkreise verwendet und waren daher für

zwei Ströme bereits vier Leitungen nötig; es wurden auch Pulsationen des magnetischen Feldes um 40% seines geringsten Wertes veranlafst. Nun versuchte man allerdings die schädlichen Pulsationen des magnetischen Feldes durch Anwendung von 4, 16 und mehr Strömen zu vermindern, man sah aber sehr bald ein, dafs in solchen Fällen die erhöhte Anzahl der nötigen Leitungen ein ernstliches Hindernis bei der Absicht praktischer Verwertung bilden würde und sind die weiteren Arbeiten im Gebiete der Drehfelderzeugung mittels zweiphasigen Wechselstromes nicht mit jener Begeisterung fortgesetzt worden, welche zum Erreichen eines hohen Zieles unerläfslich ist. Tesla hat zwar in einer seiner vielen Patentschriften einmal in Zeichnung und Beschreibung einen abhängigen Stromverlauf erörtert; er unterliefs es aber, darauf einen Patentanspruch zu erheben; offenbar hat er von einem solchen Abhängigkeitsverhältnis damals noch keine grofsen Erwartungen gehegt.

Vollkommen ausgebildet wurde das Drehstrom-System durch die Arbeiten des Chefelektrikers der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, des Herrn Dolivo von Dobrowolsky, welcher durch die Anwendung von dreiphasigen Wechselströmen, welche in Abständen von 120° zirkulieren, magnetische Drehfelder mit minimalen, in der Praxis kaum nachweisbaren Pulsationen erzeugte und durch das berühmte Experiment der Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt a. M. praktisch bewies, dafs dabei drei Leitungen vollständig genügen, nachdem diese Behauptung schon früher theoretisch aufgestellt und einwurfsfrei nachgewiesen wurde.

Aber selbst nach dem erwähnten Experiment, das nach den Ermittelungen des Prof. Weber (Zürich) mit einem Wirkungsgrade von 0,75 arbeitete, hatte man Zweifel über die Ausbildungsfähigkeit des Drehstrom-Systems und nur die Zähigkeit, mit der man bei der A. E.-G. an der weiteren Vervollkommnung der Drehstrom-Dynamos und Drehstrom-Motoren arbeitete, brachte es dahin, dafs wir heute vor einem wohlausgearbeiteten, praktisch verwendbaren neuen elektrischen System stehen, das mit Beruhigung jenen Errungenschaften einverleibt werden kann, deren wir uns in der Elektrotechnik erfreuen, und das überall mit in Betracht gezogen werden mufs, wo man elektrische Anlagen zu ändern oder zu errichten beabsichtigt.

Es bestehen derzeit schon so viele elektrische Drehstrom-Anlagen verschiedenster Gröfse, dafs wir auf Grund der vorliegenden Erfahrungen ohne weiteres behaupten können: das Drehstrom-System bietet unter sonst gleichen Verhältnissen bedeutendere Vorteile als das einfache Wechselstrom-System und es wird diesem immer vorzuziehen sein; ja selbst das Gleichstrom-System wird überall zu Gunsten des Drehstromes zurücktreten müssen, sobald es sich darum handelt, Energie auf gröfsere Entfernungen zu übertragen oder auf ein ausgebreitetes Terrain zu verteilen.

I. Abteilung.

Der (einphasige) Wechselstrom.

Die Magnetoinduktion. — Die Selbstinduktion. — Graphische Darstellung der Wechselstrom-Probleme. — Das Uhrzeiger-Diagramm. — Wellendiagramm. — Polardiagramm. — Konstruktion der Wechselstrom-Maschinen (Dynamos). — Konstruktion der Wechselstrom-Motoren. — Aufsertrittfallen der Wechselstrom-Maschinen. — Selbstregelnde Wechselstrom-Motoren. — Der Synchronismus beim Wechselstrom-Betrieb.

Anhang: Theoretische Bemerkungen über Wechselströme.

Die Magnetoinduktion.

Bewegt man einen geschlossenen Leiter (Fig. 1) in einem Magnetfelde (Fig. 2), so entstehen im ersteren elektrische Induktionsströme. Diese Ströme zeigen die gleiche Kurve, wie

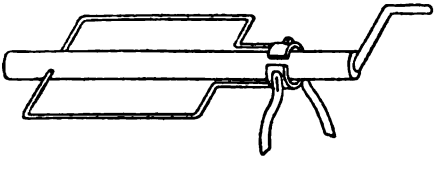


Fig. 1.

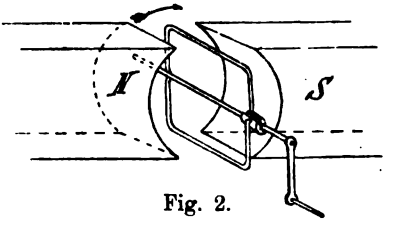


Fig. 2.

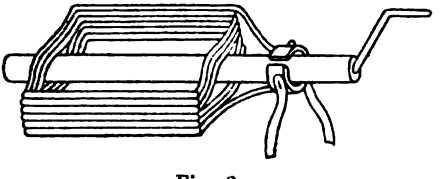


Fig. 3.

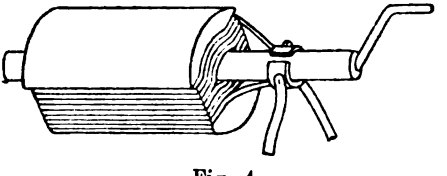


Fig. 4.

eine solche in Fig. 6a, Seite 9, dargestellt worden ist, und bezieht sich dieselbe auf die Zeitdauer, in welcher eine Winkelbewegung um 180° aufgeführt wurde. Die Induktionswirkung wird erhöht, wenn wir dem Leiter statt einer, mehrere Windungen geben (Fig. 3); sie wird weiter erhöht, wenn wir den Draht auf

einen Eisenkern wickeln, welcher der Form des freien Feldes möglichst angepafst ist. (Fig. 4.)

Bevor wir auf die moderne Bauart solcher Maschinen übergehen, wird es nötig sein, noch einige allgemeine, theoretische Erörterungen zu rekapitulieren:

Die Einheit der elektromotorischen Kraft wird in einem linearen Leiter von der Länge 1 cm erregt, wenn derselbe im homogenen magnetischen Felde $H = 1$ ($= 4\pi$ Kraftlinien) mit der Geschwindigkeit $v = 1$ parallel zu sich selbst und normal auf die Kraftlinien bewegt wird.

Die Gröfse der bei der Magnetoinduktion erzielten Spannung hängt ab: 1. von der Intensität des magnetischen Feldes (Induktionsfaktor A) bezw. von der Anzahl der Kraftlinien, die geschnitten werden, 2. von der Anzahl der Oberflächenelemente, die der Induktionswirkung direkt ausgesetzt sind (Faktor B), 3. von der Bewegungsrichtung und 4. von der zur Bewegung aufgewendeten Kraft.

Je mehr Kraftlinien möglichst rechtwinkelig geschnitten werden, je mehr Oberflächenelemente an der Induktionswirkung teilnehmen,

---

Theoretische Bemerkungen über Wechselströme.

Nehmen wir an, es seien zwei Stromkreise I und II gegeben und es ist in I eine galvanische Batterie P und ein Kontaktgeber T eingeschaltet, während II aufser der Leitung nichts anderes als einen Galvanometer enthält. (Fig. 5.)

Nun ist genügend bekannt, dafs bei jedem Schliefsen und Öffnen des Stromkreises I in II je ein Induktionsstrom erzeugt wird, dessen Kurve in Fig. 6a und b dargestellt ist.

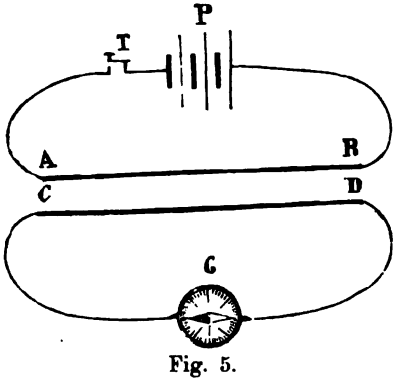


Fig. 5.

Die Richtung eines dèrart induzierten Stromes ist immer derjenigen Richtung entgegengesetzt, in welcher ein kontinuierlicher Strom in dem nämlichen Stromkreise zirkulieren müfste, um jene Bewegung hervorzubringen, welche die Ursache der Induktion war. Die induzierten Ströme sind stets das Äquivalent einer Arbeitsgröfse, welche dieselben erregt und der sie natürlich proportional sein müssen. Dieser Arbeit ist daher auch die elektromotorische Kraft E proportional, welche dividiert durch den Gesamtwiderstand von II in einem gegebenen Moment die Stärke des induzierten Stromes darstellt.

je gröfser — innerhalb gewisser Grenzen — die zur Bewegung aufgewendete Kraft ist, desto gröfser ist auch die dabei erzielte Spannung.

Gleiche Quantitäten veranlassen auch hier gleiche quantitative Induktion, d. h. in gleichen Feldern werden bei gleicher Geschwindigkeit und bei gleichen Materialmengen gleiche Elektrizitätsmengen induziert. Die Spannung allerdings hängt von der Anzahl der Oberflächenelemente ab, daher bei gleichen Materialmengen dann eine höhere Spannung erzielt wird, wenn der Leiter aus dünnerem Draht besteht.

Die Stromrichtung hängt ab von der Zu- oder Abnahme der bei der Bewegung des geschlossenen Leiters geschnittenen Kraftlinien und von der Fläche, in welcher letztere den Leiter treffen.

Regel: Steht der Nordpol rechts, verlaufen die Spiralwindungen des Leiters nach rechts und erfolgt die Umdrehung nach rechts, so fliefst der Strom nach aufwärts und der positive elektrische Pol liegt oben. Die Veränderung nur eines dieser bestimmenden Faktoren ändert auch die Stromrichtung.

Bedeutet ds und ds' das Längenelement des primären bezw. des sekundären Kreises, so weit sie der Inductionswirkung ausgesetzt sind, also innerhalb der Strecken AB bezw. CD; ferner r den bezüglichen Abstand, J die Stärke des

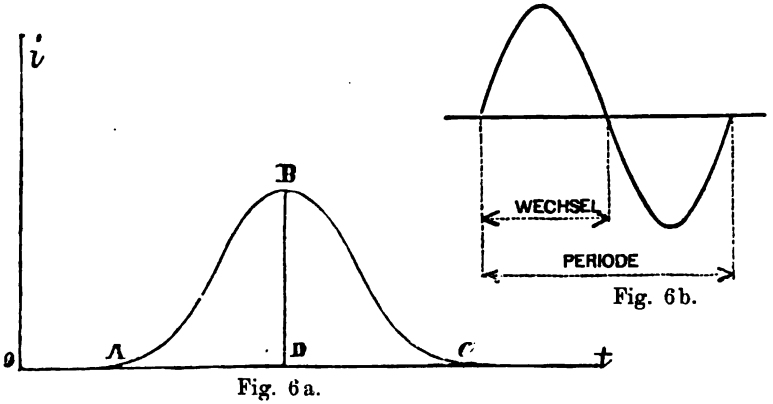


Fig. 6a.

Fig. 6b.

induzierenden Stromes am Ende einer gegebenen Zeit t und ε den Winkel der beiden Elemente, gleichviel ob sie in einer Ebene liegen oder nicht, dann gilt nach Neumann die abgeleitete Formel

$$E = a \frac{dJ}{dt} \int\int \frac{ds \cdot ds'}{r} \cos \varepsilon \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Betrachtet man einen bewegten Leiter in der Richtung der Kraftlinien und nimmt bei der Bewegung die Zahl der geschnittenen Kraftlinien zu, so entsteht im geschlossenen Leiter ein Strom, welcher entgegen der Richtung des Zeigers einer Uhr zirkuliert; nimmt die Zahl der geschnittenen Kraftlinien ab, so ändert der Strom seine Richtung und zirkuliert in gleicher Richtung, wie der Uhrzeiger.

In Fig. 2, Seite 7, wurde ein Apparat dargestellt, bei welchem in dem zwischen N und S gelegenen freien homogenen magnetischen Felde eine Drahtschleife um eine Achse rotiert werden kann. In der angedeuteten Lage ist die Zahl der Kraftlinien, welche von N nach S verlaufen und die Stromebene — d. i. die vom Leiter eingeschlossene Ebene — senkrecht treffen, ein, sagen wir positives, Maximum. Wird die Schleife in der Pfeilrichtung bewegt, so nimmt die Zahl der die Ebene treffenden Kraftlinien ab, bis sie nach einer Drehung um 90° — wenn also Stromebene und Kraftlinien parallel liegen — fast auf Null sinkt. Bei fortschreitender Bewegung beginnt zwar die Zahl der geschnittenen

---

wobei die Integration über den ganzen primären und sekundären Stromkreis auszudehnen ist. (a ist eine Konstante.)

Die Elektrizitätsmenge, welche in dem auf t folgenden Zeitelement dt den sekundären Kreis durchfließt, ist demzufolge durch den Ausdruck dargestellt

$$\frac{a\,dt}{R}\,\frac{dJ}{dt}\int\frac{ds\cdot ds'}{r}\cos\varepsilon,$$

wobei R den Widerstand in II bezeichnet.

Die Funktion:

$$P=\int\int\frac{ds\cdot ds'}{r}\cos\varepsilon$$

heißt das „elektrodynamische Potential" zweier Stromkreise aufeinander; das Vorzeichen des induzierten Stromes ist durch die Vorzeichen von P und $\frac{dJ}{dt}$ bedingt.

P und E hängen vom Winkel ε ab; für $\varepsilon=\frac{\pi}{2}$ werden beide zu Null, während sie für $\varepsilon=0$ oder $\varepsilon=\pi$ ihr absolutes Maximum erreichen.

Falls alles übrige gleich ist, wird die Stärke des induzierten Stromes ein Maximum, wenn die Elemente ds und ds' parallel sind, während sie bei rechtwinkeliger Lage der beiden Elemente gleich Null wird.

Eine wichtige Eigenschaft dieser Induktionsströme ist deren Dauer. Trägt man in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem die Zeit als Abscissen, die zugehörigen Stromstärken als Ordinaten auf, so ist das Diagramm Fig. 6a ein

Kraftlinien wieder zu wachsen, wir erhalten aber nach einer weiteren Bewegung um 90° ein negatives Maximum, weil die Kraftlinien nunmehr die Ebene auf der anderen Seite treffen, u. s. f. Gleiche Winkelgeschwindigkeit vorausgesetzt, nimmt die Induktion elektrischer Ströme im Drahte positiv zu von 0° bis 90°, negativ von 180° bis 270°, positiv ab von 90° bis 180°, negativ von 270° bis 360°, weil bei 90° und 270° Maxima bei 0° und 180° Minima der Induktion auftreten, und es ist dieses Wachsen und Fallen durch nebenstehende Sinuskurve veranschaulicht.

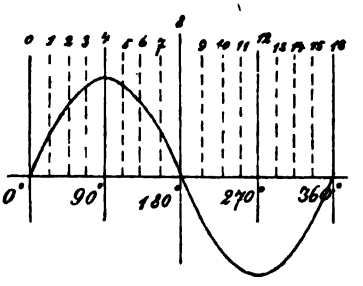


Fig. 7.

In der Figur 7 wird die Gröfse der Induktion von $22^1/_2{}^0$ zu $22^1/_2{}^0$ dargestellt.

Die Änderung der Zahl der Kraftlinien ist dem Sinus des Drehungswinkels proportional.

Bild des Stromverlaufes und, wie ersichtlich, gegen die x-Achse konkav. Die Fläche ABC zwischen der Kurve und der Abscissenachse repräsentiert offenbar die ganze in der Zeit AC transmittierte Elektrizitätsmenge Q. Bezeichnen wir mit Θ die Dauer des Stromes und die veränderliche Stromstärke mit i, so ist:

$$Q = \int_a^{a+\Theta} i\,dt,$$

wenn $OA = a$ gesetzt wird.

Q ist sowohl beim Öffnungs- als auch beim Schliefsungsstrom gleichwertig, Θ aber hat beim entgegengesetzt gerichteten Schliefsungsstrom einen höheren Wert, als beim gleichgerichteten Öffnungsstrom. Der Flächenwert $ABCA$ ist demnach für beide Ströme gleich grofs, die Basis AC ist aber beim zweiten Strom kleiner, wodurch die Maximalordinate DB in diesem Falle gröfser wird, d. h. während die Elektrizitätsmengen beim Öffnungs- und Schliefsungsstrom gleich sind, ist die Stromstärke im ersten Falle gröfser als im zweiten.

Zur theoretischen Ableitung der Gesetze für solche Induktionsströme benutzt man zumeist die Neumannsche Formel. Man kann dieselbe auch bezüglich der Selbstinduktion, d. i. die Induktionswirkung in I auf den eigenen Leiter anwenden und die elektromotorischen Kräfte derselben am Ende der Zeit t so ausdrücken, dafs wir die Stromstärke desjenigen Stromes, welcher in dem betreffenden Momente den Stromkreis durchfliefst, nach t differenzieren und den Differentialquotienten mit dem elektrodynamischen Potential des Stromkreises auf sich selbst multiplizieren. Im Momente der Schliefsung des primären Stromes entsteht durch die Fortpflanzung des von E herkommenden Stromes

Die Fig. 8 zeigt uns vor allem ein homogenes magnetisches Feld; der eingezeichnete Kreis ist die Bewegungsbahn. Bei der Bewegung von a' nach c' giebt die Linie $a'b'$ die Änderung der Kraftlinienzahl an. Wird $a'c'$ so klein angenommen, dafs wir diese Linie als Gerade ansehen dürfen, dann ist $\sphericalangle a O a' = \varphi$, ebenso $a'c'b' = \varphi$ und im rechtwinkeligen Dreieck $a'b'c'$ ist:

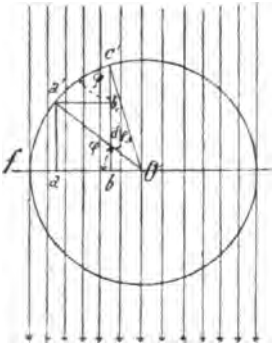


Fig. 8.

$$\sin\varphi = \frac{a'b'}{a'c'} \text{ bezw. } a'b' = a'c' \sin\varphi.$$

Weil $a'c'$ sehr klein, ist auch der $\sphericalangle a' O c' = d\varphi$ sehr klein und wir können daher statt des Bogens den Winkel setzen, d. i. $a'c' = d\varphi$ und erhalten

$$a'b' = d\varphi \sin\varphi.$$

Bildet man nun im Kreise mehrere und zwar gleich grofse Winkel $d\varphi$ und trägt man die so erhaltenen Höhen bc' in ein rechtwinkeliges Koordinatensystem derart ein, dafs man dieselben in jenen Abständen als Ordinaten auf der Abscisse errichtet, in welchen sie

---

eine Selbstinduktionswirkung, dann ein Induktionsstrom in II und endlich noch eine Reihe von Strömen durch die Induktion dieses letzteren auf den primären Stromkreis, und durch die Induktionsströme in II, veranlafst durch die Selbstinduktion in I. Am Ende des Zeitelementes dt, vom Momente der Schliefsung an gezählt, ist daher ΣE im primären Stromkreis gleich der algebraischen Summe aus der elektromotorischen Kraft E der Elektrizitätsquelle, jener der Selbstinduktion und der durch die rückwirkende Induktion des in II auftretenden Induktionsstromes. Bezeichnen wir die Stromstärken in den beiden Stromkreisen am Ende des erwähnten Zeitelementes der Reihe nach mit i und y, so lassen sich die beiden letzterwähnten elektromotorischen Kräfte beziehungsweise ausdrücken durch:

$$-P_1 \frac{di}{dt}, \qquad +P_{1,2} \frac{dy}{dt},$$

und da nach dem Ohmschen Gesetze die resultierende E nach der Zeit $t = R_1 i$ ist, so erhalten wir in unserem Falle die Beziehung:

$$R_1 i = E - P_1 \frac{di}{dt} + P_{1,2} \frac{dy}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Dabei bedeutet:

$P_{1,2}$ das elektrodynamische Potential der beiden Ströme aufeinander,

P_1, P_2 die elektrodynamischen Potentiale eines jeden Stromkreises auf sich selbst.

den angedeuteten Horizontaldurchmesser treffen, so giebt die Verbindungslinie der Ordinatenpunkte die in Fig. 7 dargestellte Sinuskurve, welche nun ein ideales Bild der Induktionswirkungen in den einzelnen Phasen des homogenen magnetischen Feldes bietet.

G. Kapp beschreibt in anschaulicher und trefflicher Weise, wie man sich ein graphisches Bild eines Wechselstromes schaffen kann.

Man stelle sich in einiger Entfernung von einer Dampfmaschine in gerader Linie mit der Zylinderachse, und sehe nach dem Kurbelzapfen. Dieser scheint sich dann auf und ab zu bewegen, während er sich nach beiden Seiten gleich weit vom Mittelpunkte der Kurbelwelle entfernt. Wir sehen in Wirklichkeit die Projektion der Kurbel auf eine Vertikale, und die Länge dieser Projektion ist in jedem Augenblicke gleich der Länge der Kurbel multipliziert mit dem Sinus des Winkels, welchen die Kurbel in diesem Augenblicke mit der Horizontalen bildet. Der Winkel ist natürlich das Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit und der Zeit. Da nun die Winkelgeschwindigkeit konstant ist, so werden wir auch eine Sinuskurve erhalten, wenn wir die Zeit auf der Horizontalen und die Projektion der Kurbel auf der Vertikalen aufgetragen denken.

In analoger Weise setzt sich die im selben Augenblick im anderen Stromkreise vorhandene elektomotorische Kraft $R_2 y$ aus der elektromotorischen Kraft $P_{1,2}\frac{di}{dt}$ des vom primären Strome induzierten Stromes, und des vom letzteren induzierten Selbstinduktionsstromes $P_2\frac{dy}{dt}$ zusammen, so dafs:

$$R_2 y = P_{1,2}\frac{di}{dt} - P_2\frac{dy}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Wir setzen nun:

$$\frac{E}{R_1} = J, \qquad J - i = x,$$

$$\frac{P_1}{R_1} = a_1, \qquad \frac{P_{1,2}}{R_1} = b_1,$$

$$\frac{P_{1,2}}{R_2} = a_2, \qquad \frac{P_2}{R_2} = b_2;$$

infolgedessen werden die Gleichungen 2) und 3) umgeformt in

$$x + a_1\frac{dx}{dt} + b_1\frac{dy}{dt} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

$$y + a_2\frac{dx}{dt} + b_2\frac{dy}{dt} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Wir werden übrigens später einen Apparat beschreiben, mit welchem man ein genaues Bild der Sinuslinie auf einfachste Weise darstellen kann.

Die Induktionswirkung hängt also — wie wir oben erörtert haben — ab von der Geschwindigkeit v, mit welcher der lineare Leiter bewegt wird, und von der Magnet-Polstärke m. Die Dimension der elektromotorischen Kraft ist:

$$E = c^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} s^{-2} = (L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

Wenn $m = 1$, dann ist: $E = \frac{1}{10^8}$ Volt,

oder die Formel im Ganzen betrachtet

$$E = \frac{1}{10^8} H\,ds \cdot \frac{dx}{dt} \sin \varphi \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 21)$$

oder anders geformt:

$$E = \underbrace{(H \sin \varphi)} \underbrace{\left(ds \frac{dx}{dt}\right)} 10^{-8} \text{ Volt}$$

wobei gemeint ist, dafs sich ein Leiterelement ds mit der Ge-

---

Multipliziert man die letztere Gleichung mit einem unbestimmten Koeffizienten λ, so erhält man durch Addition beider Gleichungen:

$$x + \lambda y + (a_1 + \lambda a_2) \frac{dx}{dt} + (b_1 + \lambda b_2) \frac{dy}{dt} = 0.$$

Setzt man nun:

$$x + \lambda y = z \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

so wird schliefslich:

$$z + (a_1 + \lambda a_2) \frac{dz}{dt} + \frac{dy}{dt} \left\{ b_1 + \lambda b_2 - \lambda (a_1 + \lambda a_2) \right\} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

λ wird bestimmt, indem man den Koeffizienten von $\frac{dy}{dt}$ gleich Null setzt, d. h. λ gleich einer der Wurzeln der quadratischen Gleichung macht:

$$a_2 \lambda^2 + (a_1 - b_2) \lambda - b_1 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Infolgedessen geht Gleichung 7) über in

$$z + (a_1 + \lambda a_2) \frac{dz}{dt} = 0,$$

woraus:

$$z = A e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda a_2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Hierin bezeichnet A die Integrationskonstante, bei deren Bestimmung man zu bedenken hat, dafs für $t = 0$ auch $y = 0$ und $i = 0$ werden, daher

$$z = x = J,$$

schwindigkeit $\frac{dx}{dt}$ an einer Stelle des magnetischen Feldes H bewegt, dessen Stärke gleich H ($c \cdot g \cdot s$ Maafs) ist, dafs der Winkel, den das Element mit den Kraftlinien bildet, die Gröfse ϱ hat, und dafs die Bewegung in der Richtung erfolgt, welche senkrecht auf der Ebene steht, die durch ds und eine das Element schneidende Kraftlinie gelegt wird. Macht die Bewegungsrichtung aber mit der eben angegebenen den Winkel ψ, dann erhält $\frac{dx}{dt}$ noch den Faktor $\cos\psi$, und die in ds induzierte elektromotorische Kraft wird:

$$E = \frac{1}{10^8} H\, ds \frac{dx}{dt} \cos\psi \,.\, \sin\varrho \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 22)$$

Dieser Fall magnetoelektrischer Induktion durch relative Bewegung zwischen einem Stromkreise und einem Magnetfelde läfst sich offenbar unter das schon früher (unterm Strich) erläuterte allgemeine Prinzip der Erregung von Induktionsströmen einreihen. Dasselbe Prinzip umfafst auch die Induktionsströme, welche in geschlossenen (Kupfer-, Eisen- etc.) Metallmassen entstehen, wenn dieselben ihre relative Lage im magnetischen Felde

---

dafs also:

$$s = Je^{-\frac{t}{a_1 + \lambda a_2}}.$$

Bedeuten λ_1 und λ_2 die Wurzeln aus Gleichung 8), so folgt aus der Gleichung 6):

$$x + \lambda_1 y = Je^{-\frac{t}{a_1 + \lambda a_2}},$$

$$x + \lambda_2 y = Je^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_2 a_2}};$$

und durch Subtraktion der zweiten von der ersten Gleichung, bezw. durch Multiplikation der ersten mit $-\lambda_2$ und der zweiten mit λ_1 und nachheriger Addition

$$y = \frac{J}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_1 a_2}} - e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_2 a_2}}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

$$x = \frac{J}{\lambda_1 - \lambda_2}\left[\lambda_1 e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_2 a_2}} - \lambda_2 e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_1 a_2}}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

und

$$i = J\left[1 - \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}\left(\lambda_1 e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_2 a_2}} - \lambda_2 e^{-\frac{t}{a_1 + \lambda_1 a_2}}\right)\right] \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

weil $x = J - i$.

Aus der letzteren Gleichung erhellt, dafs die dem Ohmschen Gesetz entsprechende Stromstärke erst bei $t = \infty$ eintritt. Wenn der sekundäre Strom-

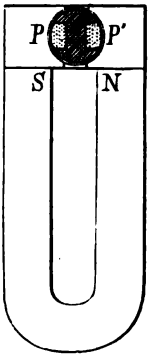


Fig. 9.

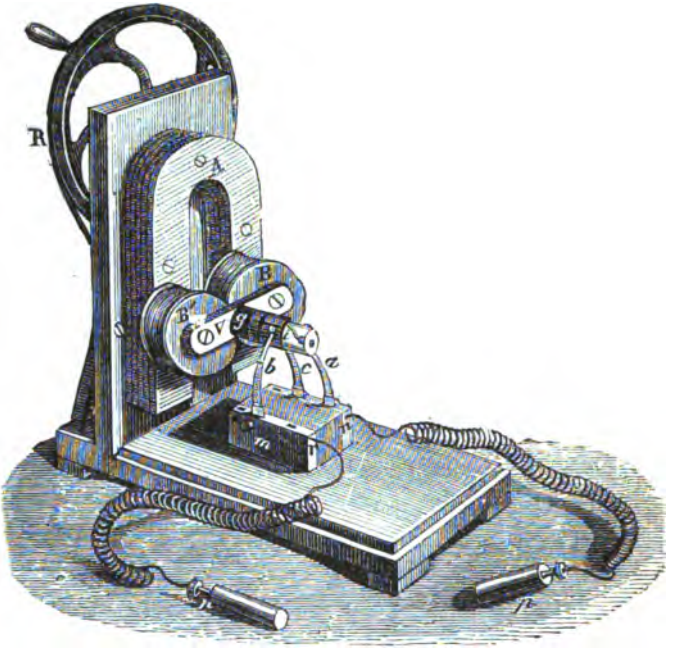


Fig. 11.

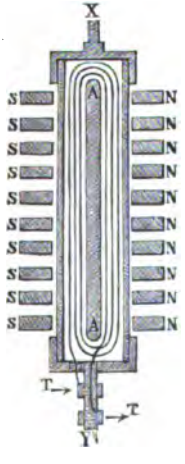


Fig. 10.

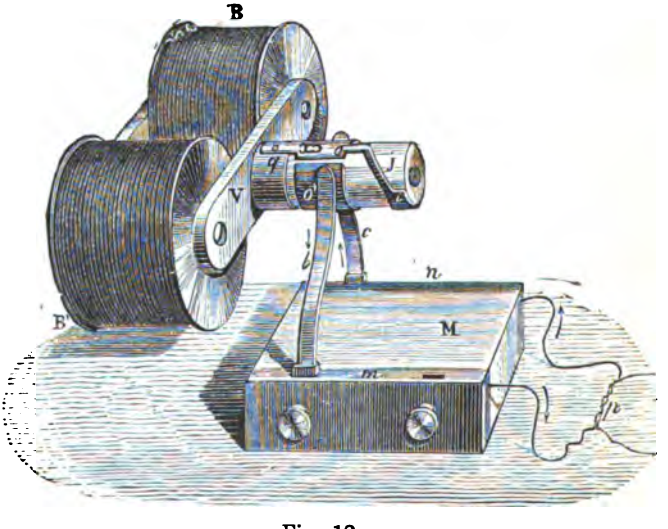


Fig. 12.

ändern. In jedem Falle aber sind die durch die wirkliche oder hypothetische relative Bewegung zwischen einem Stromkreise und einem Magnetfelde erzeugten Ströme stets der bei dieser Bewegung aufgewendeten oder produzierten Arbeit äquivalent und besitzen eine solche Richtung, dafs sie dieser Arbeit entgegenwirken.

Nach diesem Prinzip sind die in der Praxis viel tausendfach verwendeten Magnetoinduktoren von Siemens & Halske (Fig. 9

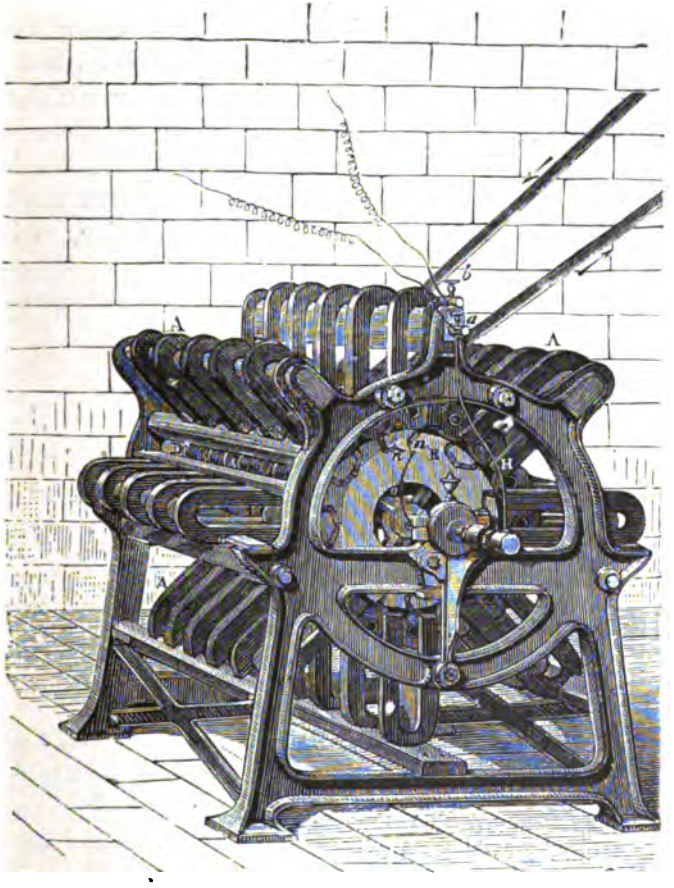


Fig. 13.

und 10), ferner die Elektromagnetmaschinen von Pixii & Clarke (Fig. 11 und 12), sowie die aufser Gebrauch gesetzten, mit zu geringem Wirkungsgrade arbeitenden Nolletschen oder sogen. Alliancemaschinen (Fig. 13 und 14) konstruiert worden.

Die Selbstinduktion. Jede Veränderung in der Stromstärke veranlafst auch Induktionswirkungen im Leiter dieses Stromes, durch welche der sogenannte „Extrastrom“ erregt wird. Dieser ist zum erregenden Strome entgegengesetzt gerichtet, wenn der letztere zu zirkulieren beginnt oder bezüglich der Intensität wächst. Die Selbstinduktion verzögert daher das Anwachsen des Stromes und bietet so einen scheinbaren Widerstand R_1. Ist R der wirkliche Widerstand, p die Zahl, welche angiebt, wie oft in einer Sekunde die Stromkurve durch Null läuft und bedeutet L den Koeffizienten der Selbstinduktion, so ist

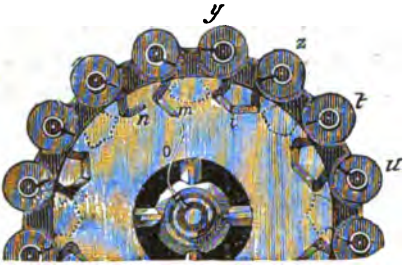


Fig. 14.

---

kreis, also auch seine Wirkung auf den primären, nicht vorhanden ist, so reduziert sich Gleichung 1) auf:

$$R_1 i = E - P_1 \frac{di}{dt}$$

und mit Rücksicht darauf geht die Gleichung 4) über in:

$$x + a_1 \frac{dx}{dt} = 0$$

oder integriert:

$$i = J\left(1 - e^{-\frac{t}{a_1}}\right) = J\left(1 - e^{-\frac{R_1}{P_1} t}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad 13)$$

Es wird aber auch in diesem Falle die Stromstärke J erst nach unendlich langer Zeit erreicht. Die in der Zeit t im Stromkreise transmittierte Elektrizitätsmenge ist bei derselben Bedingung:

$$Q = \int_0^t i\,dt = Jt - \frac{P_1 J}{R_1}\left(1 - e^{-\frac{R_1}{P_1} t}\right).$$

Das erste Glied auf der rechten Seite repräsentiert die vom kontinuierlichen Strome herrührende Elektrizitätsmenge, der Rest dagegen die vom Schliefsungs-Extrastrome herrührende Menge q_1, wenn $t = \infty$, d. h.

$$q_1 = -\frac{P_1}{R_1} J \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 14)$$

Übergehend zur Betrachtung des Momentes, in welchem der primäre Leiter geöffnet wird, bezeichnen wir mit u und v die Stromstärken jenes Stromes, der beim Öffnen des Leiters durch Selbstinduktion erregt wird, und des im sekundären Kreise induzierten Stromes am Ende der Zeit t, die wir vom Momente des Öffnens an zählen.

Da keine Reaktion des sekundären Stromes auf den primären existiert, weil letzterer unterbrochen ist, so haben wir:

$$R_1 = \sqrt{R^2 + (2\pi p L)^2} \quad \ldots \ldots \quad 23)$$

und

$$L = \frac{\sqrt{R_1^2 - R^2}}{2\pi p} \quad \ldots \ldots \quad 24)$$

Bei lang gestreckten oder bifilar gewickelten Drähten ist die Selbstinduktion eine zu vernachlässigende Gröfse. Elektromagnetspulen aber bieten eine Selbstinduktion, die mit der Anzahl der parallelen neben- und übereinanderliegenden Windungen wächst.

Fällt der Primärstrom ab oder verschwindet er, so ist der Extrastrom mit diesem gleichgerichtet, verstärkt den Primärstrom und es treten dabei nach Umständen, wenn L grofs ist, hohe Spannungen auf, welche Funken bilden, und beim Betrieb besonders berücksichtigt werden müssen.

Der Selbstinduktions-Koeffizient läfst sich als diejenige $E \cdot M \cdot K$ erklären, welche induziert wird, wenn die Stromstärke in der

---

$$R_1 u = -P_1 \frac{du}{dt} \quad \ldots \ldots \quad 15)$$

$$R_2 v = -P_{1,2} \frac{du}{dt} \quad \ldots \ldots \quad 16)$$

und zwar negativ, weil die Stromstärken u und v abnehmen.

Aus der ersteren Gleichung ergiebt sich:

$$u = Je^{-\frac{R_1}{P_1} t} \quad \ldots \ldots \quad 17)$$

vorausgesetzt, dafs der primäre Strom im Momente des Öffnens sich im Beharrungszustande befunden habe. Aus der zweiten folgt ferner:

$$v = \frac{R_1}{R_2} \frac{P_{1,2}}{P_1} u = \frac{R_1}{R_2} \frac{P_{1,2}}{P_1} Je^{-\frac{R_1}{P_1} t} \quad \ldots \ldots \quad 18)$$

Endlich ist die Elektrizitätsmenge q_2, welche dem schliefslichen Strome der Selbstinduktion entspricht:

$$q_2 = \int_0^\infty u \, dt = \frac{P_1 J}{R_1} \quad \ldots \ldots \quad 19)$$

Auch Edlund und Rijke fanden, dafs q_1 und q_2 gleich sind und haben diese Werte entgegengesetztes Zeichen; aufserdem sieht man aus den obigen rechnerischen Ausführungen, dafs die variablen Stromstärken und die Quantitäten der induzierten Ströme, sowie die durch Gleichung 12) dargestellte Stromstärke in einem gegebenen Momente der Ladungsperiode direkt proportional der Stromstärke J sind. Ebenso erhellt aus den Gleichungen 10), 11), 13) und 18), dafs sowohl die induzierten als auch die Ströme der Selbstinduktion durch transcendente Kurven dargestellt werden, und endlich folgt aus der Gleichung 12), dafs auch die Kurve der Ladungsperiode transcendent ist und die Gerade $i = J$ zur Asymptote hat.

Zeiteinheit um die Einheit wächst. Dieser Koeffizient wird beeinflufst durch die Form und durch die Magnetisierbarkeit des Leiters, und er wird erhöht, wenn sich in der Nähe des Leiters magnetisierbare Massen befinden. (Siehe auch Seite 27.)

Graphische Darstellung der Wechselstrom-Probleme.

Die mechanische (analytische) Behandlung der Wechselstrom-Probleme läfst sich aus verschiedenen Gründen nicht ohne ausgedehnte Anwendung der Hilfsmittel der höheren Mathematik durchführen; die Einflüsse der Selbstinduktion, der Phasenverschiebung und im allgemeinen die Eigenschaften des magnetischen Feldes nehmen beim Wechselstrom gewöhnlich einen so komplizierten Charakter an, dafs man zu den verwickeltsten mathematischen Ausführungen gelangt, ohne dafs die Entwickelung der Probleme dadurch für den in rein mathematischer Behandlung weniger Geübten an Übersichtlichkeit und Durchsichtigkeit gewinnt. Deshalb wendet man mit Vorliebe graphische Methoden an, von denen einige im folgenden, wenigstens in ihren Grundzügen, erläutert werden sollen.

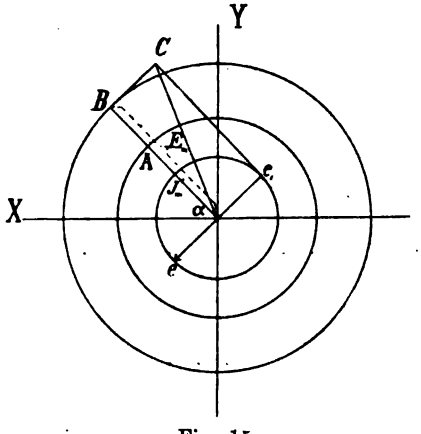


Fig. 15.

Wenn sich der Radius vector OA, welcher die maximale Stromstärke J_m eines Wechselstromes darstellen mag, um einen Mittelpunkt O (Fig. 15) bewegt, so ist die Länge der jeweiligen Projektion auf die y-Achse gleich dem augenblicklichen Werte J des Stromes, da

$$J = J_m \sin \alpha.$$

Ebenso ist

$$E = E_m \sin \alpha,$$

wenn OB die maximale elektromotorische Kraft darstellt, während E den Wert in einem bestimmten Zeitmomente bedeutet. Treten nun Einflüsse auf, welche den beschriebenen harmonischen Verlauf der angegebenen Gröfsen zu stören bestrebt sind, wie z. B. die

Selbstinduktion, so läfst sich deren Wirkung folgendermaafsen darstellen: Letztere wächst nämlich in dem Maafse, als sich der augenblickliche Strom der Null nähert, wird also den gröfsten Wert haben, wenn dieser gleich Null ist, d. h. wenn OA in die Abscissenachse fällt. Die Selbstinduktion tritt als eine elektromotorische Gegenkraft auf; nimmt man als Sinn der Rotation die Bewegung des Uhrzeigers an und hält man fest, dafs die Stromstärke in den bezeichneten Quadranten liegt, so wird die bestimmte maximale Selbstinduktion durch eine bestimmte in der Richtung des Pfeils liegende Gerade Oe dargestellt. Dann werden die Projektionen von Oe wieder die augenblicklichen Werte der Selbstinduktion angeben. Soll nun die Stromstärke denselben Wert behalten, so mufs eine gleich- und entgegengesetzt wirkende Kraft angenommen werden, welche die Wirkung der Selbstinduktion aufhebt. Die Resultante aus beiden elektromotorischen Kräften ist diejenige Spannung, welche die Maschine leisten mufs. Man erhält sie durch geometrische Addition der beiden Strecken.

Eine derartige Darstellung der in Betracht kommenden Gröfsen wird ein „Uhrzeiger-Diagramm“ genannt; es können damit selbst kompliziertere Vorgänge im Wechselstromkreise dargestellt werden.

Eine zweite graphische Methode beruht bekanntlich darauf, in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem z. B. die Zeit als Abscisse und die Stromstärken als Ordinaten aufzutragen. Die entstehende Kurve nimmt die Form einer Sinuslinie an, aus der man den Verlauf der elektromotorischen Kraft, welche die Maschine in jedem Momente erzeugt, im Verhältnis zu dem der Stromstärke, insbesondere aber auch die Voreilung oder das Zurückbleiben der einen oder der anderen Kurve ablesen kann. Wenn die Zeit auf einer Koordinatenachse aufgetragen wird, so ergiebt die Differenz zweier benachbarter Durchschnittspunkte (der Abscisse und der Kurve) unmittelbar ein Maafs für die Phasenverschiebung.

Aufser dieser Art von „Wellendiagrammen“ verwendet man ferner mit vielem Vorteil die sogenannten „Polardiagramme“, welche von Fleming beschrieben wurden, und deswegen empfohlen werden können, weil damit der Verlauf einer bestimmten elektrischen Gröfse durch eine geschlossene Kurve dargestellt wird. Dieser Umstand erleichtert die Übersichtlichkeit ganz wesentlich. Das Prinzip der Methode besteht in folgendem:

Die Gerade OP rotiert um den Punkt O (Fig. 16) und der Winkel Θ, den OP mit einer festen durch O gehenden Geraden bildet, heifst der „Veränderungswinkel“ der rotierenden Geraden. Auf dieser liegt ein Punkt in der Entfernung r vom Zentrum, der bei der Drehung des Vector OP auf diesen gleitet, und eine Kurve nach einem bestimmten Gesetze, wie es z. B. der Verlauf einer Wechselstromgröfse mit sich bringt, beschreibt: das Polardiagramm!

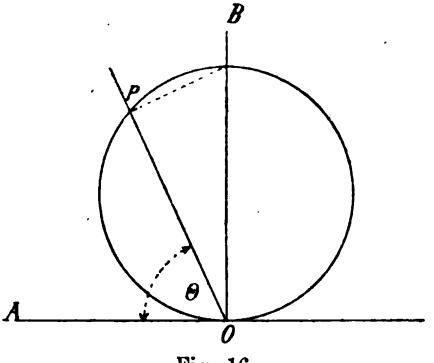


Fig. 16.

Wir wollen zunächst an dieser Art der Darstellung zeigen in welcher Weise sich die einzelnen in Frage kommenden Gröfsen ergeben.

Das Polardiagramm ist eine geschlossene Kurve, die mit einem Nullwert beginnt, zu einem Maximum ansteigt und wieder zum Nullpunkt herabsinkt. OP durchläuft eine Reihe von Werten, während Θ von o bis π ansteigt. Nimmt man an, dafs OP sich verändert wie $\sin\Theta$, d. h. dafs $r = R \cdot \sin\Theta$ sei, so wird das Polardiagramm ein Kreis.

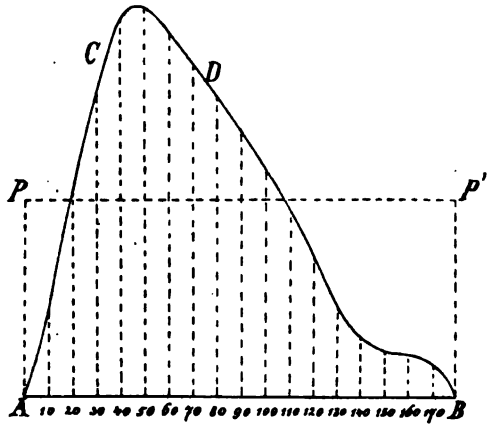


Fig. 17.

Ziehen wir $OB \perp OA$ und $PB \perp OP$, so folgt, da $AOP = \Theta$ und $OP = r$, dafs PBO immer gleich Θ und $OB\,(= R)$ von konstanter Länge ist, aber nur unter der Annahme, dafs $r = R \cdot \sin\Theta$. Folglich ist der Ort aller Punkte P ein Kreis, und dieser die durch O, P und B gehende Kurve, welche in einem Polardiagramme eine einfache periodische Gröfse darstellt. Nun wird aber die Kurve ihre Gestalt ändern, wenn das Gesetz, nach dem sich die Wechsel-

strom-Gröfse ändert, kein einfach periodisches mehr ist. Will man die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Wertes einer so dargestellten periodischen Gröfse bestimmen, so ist dies hier viel leichter auszuführen möglich, als bei einem Wellendiagramme.

Es sei z. B. in Fig. 17 das Wellendiagramm einer thatsächlichen elektromotorischen Kraft dargestellt, welche nicht dem

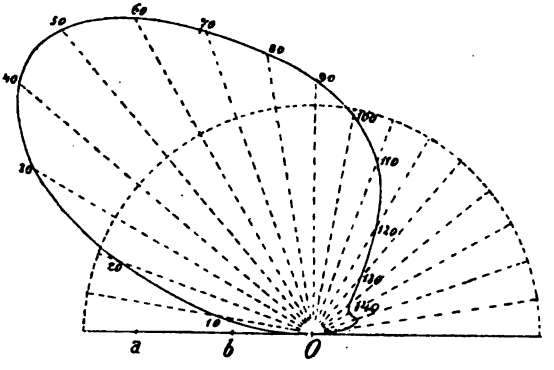


Fig. 18.

einfachen Sinusgesetze folgt und den augenblicklichen Werten der Periode in Intervallen von 20° zu 20° entsprechen. Will man nun die quadratischen Mittelwerte finden, so hat man die bezüglichen Längen zu messen, zu quadrieren und die Quadratwurzel aus dem Mittel dieser Quadrate zu nehmen.

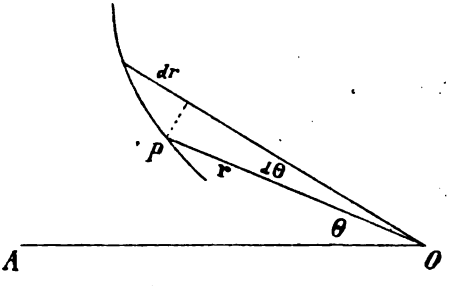


Fig. 19.

Je nachdem nun die Wellenform der Kurve eine kompliziertere Gestalt annimmt, ist der Genauigkeit wegen die Zahl der Ordinaten zu vermehren, so dafs oft bei einer verwickelten Kurve eine beträchtliche Anzahl von Bestimmungspunkten erforderlich werden dürfte.

Nun wollen wir in Fig. 18 dieselbe periodische Gröfse durch ein Polardiagramm darstellen, und die Fig. 19 enthalte einen Radius vector $OP(r)$ und den korrespondierenden Phasenwinkel Θ, sowie die kleine Änderung dr und $d\Theta$. Nunmehr ist die

kleine Fläche dA, welche dr durchlaufen hat, bei Änderung von Θ um $d\Theta$ gleich $\frac{1}{2} r^2 d\Theta$, und der Wert der ganzen Fläche, die von der Polarkurve $O P Q R$ eingeschlossen ist:

$$A = \int_0^{\pi} \frac{1}{2} r^2 d\Theta \quad \ldots \ldots \ldots \quad 25)$$

Es sei ferner über der Querlinie ein Halbkreis vom Polarzentrum O aus geschlagen, und es soll der damit eingeschlossene Flächenraum gleich dem von der Polarkurve beschriebenen sein. Der Radius dieses Halbkreises sei $O A = R$, dann ist:

$$\frac{\pi R^2}{2} = A = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} r^2 d\Theta,$$

oder

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} r^2 d\Theta} \quad \ldots \ldots \quad 26)$$

Der Wurzelwert ist aber die Quadratwurzel aus dem Mittel der Quadrate der augenblicklichen Werte von r. Damit ist der Weg gegeben, den quadratischen Mittelwert z. B. einer periodischen Stromstärke zu finden. Man beschreibt zu diesem Zwecke über einer Geraden einen Halbkreis und zieht Radien dieses Halbkreises in Winkelintervallen, welche gleich jenen Phasenintervallen sind, für welche die entsprechenden Werte beobachtet wurden. Auf diesen Radien werden Längen abgetragen, welche den entsprechenden Werten dieser Gröfsen proportional sind. Die Verbindung der Endpunkte ergiebt das Polardiagramm. Seinen Inhalt bestimmt man durch einen Planimeter, und eine Kreisflächentafel ergiebt den Kreis, dessen Inhalt doppelt so grofs ist, wie jener der Polarkurve. Der Radius dieses Kreises ist die Quadratwurzel des Mittels der Quadrate der periodischen Gröfse, also z. B. für eine Stromstärke bezw. deren dynamometrisch gemessenen Wert.

Welche Art von graphischer Darstellung sich nun im gegebenen Falle empfiehlt, ist nicht von vornherein zu sagen. Am gebräuchlichsten ist wohl das Uhrzeigerdiagramm, dessen Ausbildung Blakesley so sehr gefördert hat. Wir wollen nun an Beispielen die Bequemlichkeit und Nützlichkeit der graphischen

Darstellung weiter verfolgen. Wir wissen, dafs ein Elektrodynamometer die „effektive“ Stromstärke eines Wechselstromes mifst, und es handelt sich nun darum, auf graphischem Wege zu entscheiden, in welchem Verhältnisse der auf diese Weise gewonnene Wert zu der maximalen Stromstärke steht. Bezeichnet man in Fig. 20 mit OJ_m die maximale, mit OJ die augenblickliche Stromstärke, so ist die Ablenkung des Dynamometers proportional dem Quadrate von OJ.

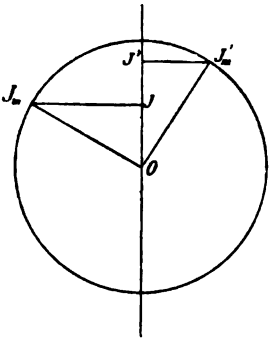


Fig. 20.

Nimmt man nun einen entsprechenden, um 90° verschobenen Wert an, so zeigt sich, dafs die Summe der Quadrate von OJ und OJ' gleich dem Quadrate der Maximalstromstärke ist, da

$$\overline{OJ}^2 + \overline{OJ'}^2 = \overline{OJ_m}^2 - \overline{J_m J}^2 + \overline{OJ'_m}^2 - \overline{J'_m J'}^2.$$

Es ist nun aber

$$OJ_m' = OJ_m \text{ (weil } OJJ_m \cong OJ'J'_m)$$

und

$$OJ = J'J'_m$$

und daraus folgt:

$$\overline{OJ}^2 + \overline{OJ'}^2 = 2\,\overline{OJ_m}^2 - \overbrace{[\overline{J_m J}^2 + \overline{OJ}^2]}^{\overline{OJ_m}^2}$$

$$= \overline{OJ_m}^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 27)$$

oder

$$\tfrac{1}{2}(\overline{OJ}^2 + \overline{OJ'}^2) = \tfrac{1}{2}\,\overline{OJ_m}^2 \quad \ldots\ldots \quad 28)$$

Die Gesamtwirkung einer kontinuierlichen Reihe von dynamometrischen Wirkungen wird nun angenähert durch eine grofse Anzahl von Werten von OJ dargestellt. Die obenstehende, letzte Gleichung zeigt, dafs der Mittelwert der Quadrate der augenblicklichen Stromstärken gleich dem halben Quadrate der maximalen Stromstärke J_m ist. Dieser Wert bleibt aber unter allen Umständen gleich, wie auch die Lage eines Radius mit dem dazu gehörigen um 90° gedreht sein möge; folglich gilt auch unter allen Umständen, wenn J_m die maximale, J die dynamometrisch gemessene oder „effektive“ Stromstärke bedeutet:

$$J = \frac{J_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,J \quad \ldots\ldots\ldots \quad 29)$$

Ein analoges Gesetz läfst sich für die entsprechenden Spannungen ableiten.

Auch bei der Ermittelung der Energie eines Wechselstromes führt die graphische Methode rasch zum erwünschten Ziele. Wir wissen, dafs die Phasenverschiebung eine Voreilung bezw. ein Zurückbleiben der elektromotorischen Kraft vor bezw. hinter der Stromstärke zur Folge hat; deshalb werden in einem Momente niemals Stromstärken und Spannungen denselben Wert haben, so dafs die sekundliche Leistung in dem Produkt EJ niemals ihren richtigen Ausdruck finden würde.

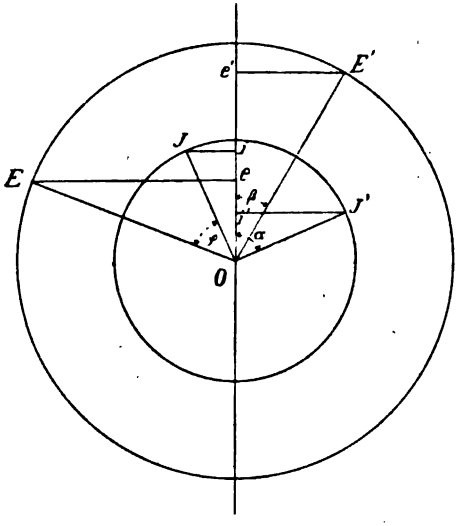


Fig. 21.

In Fig. 21 stellen OE und OJ resp. OE' und OJ' die augenblicklichen Werte von Spannung und Strom dar, während die entsprechenden Projektionen Oe, Oi und Oe' und Oi' sein mögen. Für beide Lagen ist der Mittelwert der Energie:

$$\tfrac{1}{2}(e\,i + e'\,i').$$

Nun ist

$$e = EJ \sin\alpha \cdot \sin\beta$$
$$e'\,i' = EJ \cos\alpha \cdot \cos\beta,$$

folglich $\tfrac{1}{2}(e\,i + e'\,i') = \tfrac{1}{2} EJ \cos(\alpha - \beta)$,

$(\alpha - \beta)$ ist aber nichts anderes, als der Phasenverschiebungs-Winkel. Daraus ergiebt sich, unter Berücksichtigung, dafs

$$E = e_{\text{eff}}\sqrt{2} \text{ und } J = i_{\text{eff}}\sqrt{2} \quad \ldots\ldots 30)$$
$$\tfrac{1}{2}(e\,i + e'\,i') = e_{\text{eff}}\, i_{\text{eff}} \cos\varphi \quad \ldots\ldots 31)$$

Weitere theoretische Betrachtungen.

Auch der durch Magnetoinduktion erzeugte Wechselstrom ist dadurch charakterisiert, dafs die Stromstärke kontinuierlich von einem Nullwerte zu einem positiven Maximum anwächst, auf Null abfällt, ein negatives Maximum erreicht, wieder Null wird u. s. f. Da aber Stromschwankungen stets Selbst-Induktionswirkungen zur Folge haben, ist es leicht verständlich, dafs diese

hier einen wesentlichen Einfluſs ausüben müssen. Die Selbstinduktion ist daher eine wichtige Gröſse, deren rechnerische Berücksichtigung viele Schwierigkeiten veranlaſst und die wir hier noch weiter in Betracht ziehen wollen. Die Magnetoinduktion wurde von Faraday im Jahre 1832 entdeckt und etwa 20 Jahre später von Helmholtz und wohl auch von anderen wissenschaftlich behandelt. Es ergab sich, daſs im Momente des Stromschlusses in jedem Leiter, besonders aber in Spulen eine elektromotorische Gegenkraft auftritt, welche das sofortige Anwachsen des Stromes verhindert. Bezeichnen wir mit N die Induktion und mit E die durch N hervorgerufene elektromotorische Gegenkraft, die, weil sie entgegengesetzt zur wirkenden Kraft verläuft, mit dem Minuszeichen versehen wird, so ist

$$E = -\frac{dN}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 32)$$

Wenn wir nun die Energiegleichung aufstellen, so erinnern wir uns, daſs die Anzahl der Kraftlinien N der Stromstärke J proportional ist und eine Änderung dargestellt wird durch

$$\frac{dN}{dt} = L\frac{dJ}{dt}$$

(L = Selbstinduktions-Koeffizient).

Ferner ist nach dem Jouleschen Gesetze die in dt entwickelte Wärme, also die Energie W gleich dem Produkte aus Stromstärke in Spannung in dt Sekunden, demnach

$$W = E\,J\,dt.$$

Wir sehen, daſs die bei der Änderung der Kraftlinienzahl entstehende EMK ausgedrückt würde durch:

$$E = -\frac{dN}{dt} = -L\frac{dJ}{dt}.$$

Führen wir diese beiden Werte von E nach einander in den Ausdruck $(E\,J\,dt)$ für die entwickelte Wärme ein, so ergiebt sich:

$$-\frac{dN}{dt}J\,dt = -L\frac{dJ}{dt}J\,dt.$$

Da aber EJ auch gleich J^2R ist, erhalten wir durch Hinzufügen von $J^2R\,dt$ die Energiegleichung

$$E\,J\,dt = J^2\,R\,dt + L\frac{dJ}{dt}J\,dt$$

oder

$$E = JR + L\frac{dJ}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 33)$$

und dieses E ist nun die vielgenannte „impressed EMF“, ein bis jetzt noch nicht klar übersetzter Ausdruck, der aber neuerer Zeit mit „treibender“, „eingeprägter“ EMK oder auch mit (nach C. S. Feldmann) „EM-Gesamtkraft“ übersetzt wird.

Ferner hat Helmholtz den Begriff „Zeitkonstante der Selbstinduktion“ eingeführt; dieselbe giebt den Zusammenhang zwischen Stromstärke und EMK an und stellt die Stromstärke als Funktion der Zeit dar.

Aus der letzten Gleichung rechnen wir, dafs

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{R}{L}J$$

$$dt = \frac{dJ}{\frac{E}{L} - \frac{RJ}{L}},$$

und da dieser Ausdruck integrierbar:

$$\int dt = \int \frac{dJ}{\frac{E}{L} - \frac{RJ}{L}} = \frac{L}{R}\int \frac{d\left(\frac{E}{L} - \frac{RJ}{L}\right)}{\left(\frac{E}{L} - \frac{R}{L}J\right)}$$

und (wobei $ln = \log.\,nat.$)

$$t = -\frac{L}{R}\,ln\left(\frac{E}{L} - \frac{R}{L}J\right) + \text{Konst.}$$

Zur Bestimmung der Konstanten setzen wir, weil für $t = 0$ auch $J = 0$:

$$0 = -\frac{L}{R}\,ln\,\frac{E}{L} + \text{Konst.}$$

und erhalten:

$$\text{Konst.} = \frac{L}{R}\,ln\,\frac{E}{L} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 34)$$

Somit durch Einsetzung dieses Wertes:

$$t = -\frac{L}{R}\left[ln\left(\frac{E}{L} - \frac{RJ}{L}\right) - ln\,\frac{E}{L}\right]$$

$$= -\frac{L}{R}\,ln\,\frac{\frac{E}{L} - \frac{RJ}{L}}{\frac{E}{L}}$$

oder mit $-\frac{R}{L}$ multipliziert $-\frac{R}{L}t = ln\left(1-\frac{RJ}{E}\right)$,

$$e^{-\frac{R}{L}t} = \left(1-\frac{RJ}{E}\right),$$

$$\frac{RJ}{E} = 1 - e^{-\frac{R}{L}t}$$

und

$$J = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 35)$$

Auch aus dieser Formel ersehen wir, daſs die Stromstärke theoretisch ihren konstanten Wert erst in unendlich langer Zeit erreicht; das Experiment lehrt aber, daſs es verhältnismäſsig nur kurze Zeit dauert, um zu dem in der Praxis erreichbaren Maximum zu gelangen. Man kann nun auch die gesamte Elektrizitätsmenge berechnen, welche der Selbstinduktion bis $t = \infty$ entspricht. Ist nämlich die Differenz zu einer bestimmten Zeit $i = J_0 - J$, dann ist $J_0 = \frac{E}{R}$, also

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

und die gesamte Elektrizitätsmenge $\int_0^\infty i\,dt$, also:

$$\int_0^\infty i\,dt = \frac{E}{R}\int e^{-\frac{R}{L}t}\,dt$$

$$-\frac{E}{R}\cdot\frac{L}{R}\int e^{-\frac{R}{L}t}\,d\left(-\frac{R}{L}t\right) = -\frac{E}{R}\cdot\frac{L}{R}\left[e^{-\frac{R}{L}t}\right]$$

$$= -\frac{E}{R}\cdot\frac{L}{R}(0-1),$$

$$\int_0^\infty i\,dt = \frac{E}{R}\cdot\frac{L}{R} = J_0\frac{L}{R} = J_0\,T \quad \ldots\ldots \quad 36)$$

Daraus: die Zeitkonstante $T = \frac{L}{R}$ ist diejenige Zeit, während welcher die konstant gewordene Stromstärke wirken müſste, um die gesamte Elektrizitätsmenge zu ergeben, welche infolge der Selbstinduktion verschwunden ist. Zur Zeit T ist die gesamte Stromstärke

$$J = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}T}\right)$$

für $t = T = \frac{L}{R}$ zu setzen

$$J = \frac{E}{R} 0{,}63 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 37)$$

d. h. der Strom erreicht in der Zeit T circa $^2/_3$ seines Maximalwertes.

Die Dimension der Selbstinduktion ist eine Länge; man mifst sie nach Quadranten und als praktische Einheit ist das „Henry" vorgeschlagen worden.

Beziehen wir uns weiter auf Formel 32), so ist

$$N = HF \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 38)$$

wenn H die Intensität des Feldes, F die Fläche und φ den Drehungswinkel bedeutet.

Setzen wir dies in Formel 32) ein, so erhalten wir:

$$E^0 = HF \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 39)$$

$$= \omega HF \sin \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 40)$$

wenn die Winkelgeschwindigkeit $\frac{d\varphi}{dt} = \omega$ gesetzt wird.

Diese elektromotorische Kraft erhält man im Felde, wenn keine Selbstinduktion vorhanden und der Stromkreis offen ist.

Nun gilt bei einer harmonischen Bewegung:

$$E^0 = E_{max} \sin \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 41)$$

und diese elektromotorische Kraft wird vom Felde in der Spule erregt; man nennt sie induzierte elektromotorische Kraft (siehe die impressed electro-motive force), und sie ruft einen Strom hervor:

$$J = \frac{E - L\frac{dJ}{dt}}{R} = \frac{E_{eff}}{R}.$$

Es schafft sich daher der Strom in der Spule eine EMK, welche negativ wird, wenn $\frac{dJ}{dt}$ positiv ist; diese neu eingeführte EMK heifst „effektive elektromotorische Kraft" und sie wird an einem Dynamometer gemessen, wie solche auch bei Gleichstrommessungen angewendet werden.

Wenn $\frac{T}{2}$ die Zeit eines Stromwechsels bedeutet, so entsteht E_{max} bei $\frac{T}{4}$.

$E^0 = E_{max} \sin \varphi$ gilt, so lange der Stromkreis offen ist; schliefsen wir diesen durch einen Gesamtwiderstand R, dann ist:

$$E_{eff} = \omega F H \sin \varphi - L \frac{dJ}{dt} = RJ \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 42)$$

oder

$$\frac{dJ}{dt} = -\frac{R}{L} J + \frac{\omega F H}{L} \sin \omega t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 43)$$

und wir erhalten in weiterer Folge:

$$J = \frac{\omega F H}{L} \cdot \frac{\frac{R}{L} \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\omega^2 + \frac{R^2}{L^2}} \cdot e^{-\frac{R}{L} t} + \text{Konst.}\, e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Die Konstante hat nur für den Anfang Bedeutung, da dieselbe später bei gröfseren Werten von t gleich Null wird.

Führt man, um den sin und cos zusammenzufassen, einen Hilfswinkel δ derart ein, dafs $\frac{R}{Lp} = \cos \delta$, $\frac{\omega}{p} = \sin \delta$ ist, so dafs $\operatorname{tang} \delta = \frac{\omega L}{R}$ wird, so erhält man schliefslich

I. $$J = \frac{E^0_{max}}{R} \cos \delta \cdot \sin (\omega t - \delta).$$

Wenn keine Selbstinduktion vorhanden, dann ist im Vergleich zur vorstehenden Formel

$$J = \frac{E^0_{max} \sin \omega t}{R}.$$

Infolge der Selbstinduktion wird also der Strom geringer; er wird aber auch zu einer anderen Zeit als für $t = 0$ zu Null, etwa wenn $\omega t = \delta$; er hat also eine Verzögerung erfahren und man sagt dann, dafs er in der Phase verschoben sei.

Setzt man für

$$\cos \delta = \frac{\frac{R}{L}}{p} = \frac{\frac{R}{L}}{\sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad . \quad . \quad 44)$$

dann wird

II. $$J = \frac{E^0_{max} \sin (\omega t - \delta)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Hierbei ist $\delta = \omega \tau$ (τ eine Zeit).

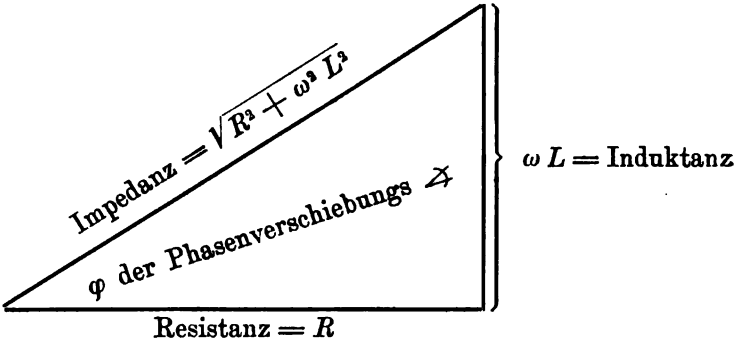
Ist keine Selbstinduktion vorhanden, so erhält man:

$$J = \frac{E^0_{max} \sin(t - \tau)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 45)$$

Der Strom wird Null (wenn $T = \tau$) bei $\frac{T}{2} - \tau$; er erreicht das Maximum nicht bei $\frac{T}{4}$, sondern bei $\frac{T}{4} - \tau$.

Den Ausdruck $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ nennt man die Impedanz,
„ „ ωL „ „ „ Induktanz und
„ „ R „ „ „ Resistanz oder auch den Ohmschen Widerstand.

Diese drei Gröfsen stehen in folgendem Verhältnisse:



Die Bedeutung der Mittelwerte. Da ein Dynamometer, das zur Messung der Stromstärken J benutzt wird, durch den Torsionswinkel α angiebt, dafs

$$J^2 = c\alpha,$$

messen wir quadratische Werte und nennen mittlere Stromstärke:

$$\sqrt{M(J^2)}.$$

Wir müssen untersuchen, in welchem Verhältnis dieser Wert zur maximalen Stromstärke steht. Nun giebt es noch für andere Wirkungen der Stromstärke andere Mittelwerte und diese folgen aus der Quadratur der Sinuskurve; man bezeichnet dann mit $M(J)$ den „wahren Mittelwert".

Zu einer beliebigen Zeit ist:

$$J = J_{max} \sin \omega t$$

und

$$M(J)\frac{T}{2} = \int_0^{T/2} J_{max} \sin \omega t \, dt,$$

wenn $\omega = \frac{2\pi}{T}$: $$M(J) = \frac{2}{\pi} J_{max} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 46)$$

analog:

$$M(E) = \frac{2}{\pi} E_{max} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 47)$$

und zwar sind dies algebraische Mittelwerte.

Ist $\sqrt{M(J^2)}$ der gemessene Mittelwert, so besteht folgender Zusammenhang:

$$\frac{T}{2} \cdot M(J^2) = \int_0^{\frac{T}{2}} J_{max}^2 \sin^2 \omega t \, dt$$

$$= J_{max}^2 \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, dt$$

oder

$$\frac{T}{2} M(J^2) = J_{max}^2 \frac{T}{4}$$

und daraus:

$$\sqrt{M(J^2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} J_{max} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 48)$$

analog

$$\sqrt{M(E^2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{max} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 49)$$

Aus obigen Gleichungen folgt ferner:

$$J_{max} = \frac{\pi}{2} M(J) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 50)$$

$$J_{max} = \sqrt{2}\sqrt{M(J^2)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 51)$$

$$M(J) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{M(J^2)} = 0{,}9003 \sqrt{M(J^2)} \quad . \quad . \quad 52)$$

und analog

$$M(E) = 0{,}9 \sqrt{M(E^2)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 53)$$

Das Ohmsche Gesetz gilt in jedem Augenblicke nur bei Wahl der korrespondierenden Mittelwerte.

Falls um einen Leiter (Spule) ein wechselnder Magnetismus pulsiert, wird:

$$E = 2 p w N 10^{-8} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 54)$$

wobei w die Windungszahl der Spule,
p die Anzahl der Polwechsel pro Sek.,
N die Zahl der eingeschlossenen Kraftlinien bedeutet.

Ist w und auch p konstant, was ja gewöhnlich zutrifft, dann ist klar, dafs E nur eine Funktion von N sein kann

$$E = c\,N\ .$$

Ist E sinusoidal, so setzt dies die sinusoidale Änderung des Magnetismus voraus und umgekehrt.

In der Fig. 22 sehen wir, dafs zu den Zeiten $A\,C\,E$ der Magnetismus rascher als zu den Zeiten B und D wechselt, daher tritt das Spannungsmaximum zu den Zeiten A, C und E auf; Spannung und Magnetismus sind also nicht nur quantitativ, son-

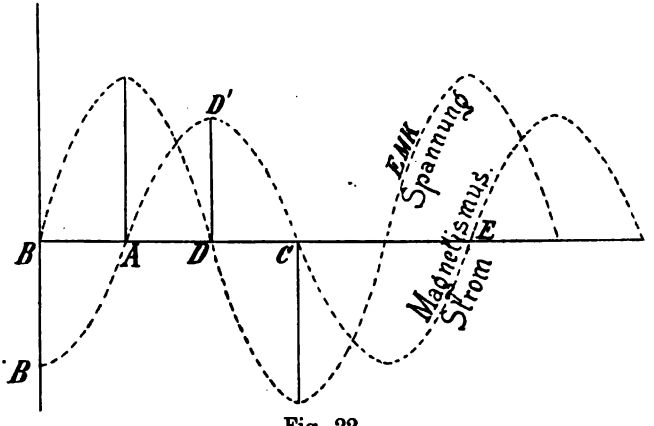


Fig. 22.

dern auch qualitativ (der Form der Kurve entsprechend) und zeitlich (in der Phasenstellung) fest aneinander gekuppelt.

Bei jeder magnetischen Wirkung bleibt die Stromstärke hinter der $E\,M\,K$ zurück, bei elektrostatischen Wirkungen eilt J in der Phase der $E\,M\,K$ voraus.

Die Phasenverschiebung, d. i. die Gröfse des Phasenunterschiedes, ist von der Gröfse der von den eingeschalteten Apparaten erzeugten Gegenwirkung (Induktionsspannung bezw. Kapazität) abhängig, und es kann theoretisch die Phasendifferenz zwischen J und E $^1/_4$ Periode (90°) werden. Letzteres erfolgt bei der gröfsten Induktionsspannung und diese wird bei der gröfsten Stromänderung, d. i. wenn der Strom durch Null geht, erregt.

Wird in einem Stromkreise mit Phasenverschiebung die Spannung in den einzelnen Momenten mit der diesen Zeitmomenten

entsprechenden Stromstärke multipliziert (Fig. 23) und findet man, dafs die so ermittelten Watt nicht während der ganzen Periode positiv sind, sondern sich, je nachdem der $\measuredangle \varphi$ gröfser oder kleiner wird, verändern, so dafs ein gröfserer oder kleinerer

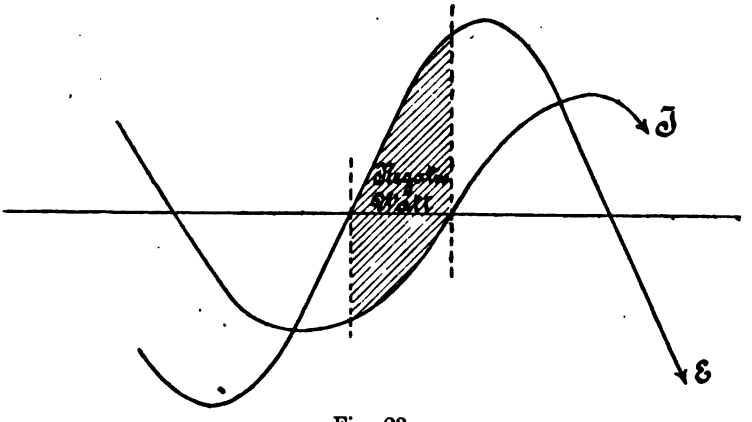


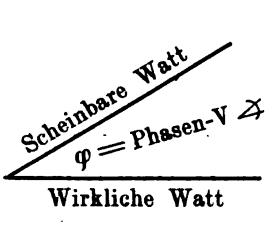
Fig. 23.

Teil der Watt „negative" erscheint, so heifst das: Die Stromquelle wird nicht während der ganzen Periode Energie liefern, sondern auch Energie empfangen [1]).

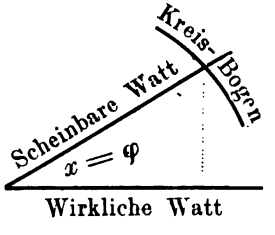
Besteht in einem Wechselstromkreise zwischen E und J ein Phasenunterschied, so ist die „geleistete" bezw. „aufgewendete" Arbeit nicht gleich den „scheinbaren Watt", d. i. $M(J) \times M(E)$; sie ist vielmehr gleich

$$M(J) \times M(E) \times \cos \varphi .$$

Ist $\cos \varphi$, d. i. der Phasenverschiebungswinkel, bekannt, so kann man die graphische Ermittelung der bezügl. Watt ermöglichen. Sind die „scheinbaren" und die „wirklichen Watt" ermittelt, dann ist auch der $\measuredangle \varphi$ (bezw. sein Cosinuswert) graphisch darstellbar u. zw. nach folgendem Diagramm:



oder:



[1]) Bei Motoren herrschen dann umgekehrte Verhältnisse.

Die „wirklichen“ Watt werden mit dem Wattmeter gemessen.

Aus der Figur 22 ergiebt sich ferner, dafs der um 90° gegen seine Spannung verschobene Strom keine geleistete Arbeit repräsentiert, sondern nur eine oscillierende Energie, da er $\frac{T}{2}$ mit seiner Spannung $\frac{T}{2}$ gegen seine Spannung gerichtet ist. Dieser „wattlose Strom“ wird ausschliefslich die Magnetisierung besorgen und wird deswegen auch „Erregerstrom“ genannt. Fig. 24 zeigt das bezügliche Diagramm.

Dobrowolsky giebt hierzu folgendes Beispiel: Ein Eisenring wird mit Draht bewickelt und mit Wechselstrom von 100 Volt gespeist. Eine Messung habe beispielsweise den Verlust im Eisen als Foucaultströme und Hysteresis zu 140 Watt ergeben; aus dem Widerstande der Wickelung (= 0,1 Ohm) und der Stromstärke (10 Ampère) ergiebt sich noch der Wattverlust im Kupfer mit 10 Watt. Der totale Energieverbrauch ist daher mit 150 Watt anzusetzen. Dies ergiebt bei 100 Volt Spannung einen „Wattstrom“ von 1,5 Ampère. Konstruieren wir nun das zugehörige Diagramm:

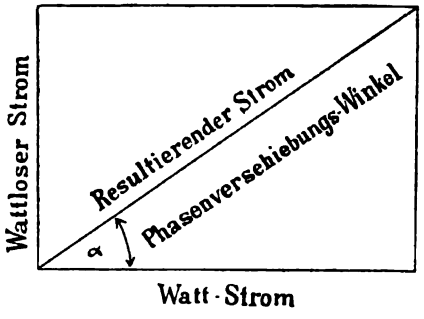


Fig. 24.

Wattstrom = 1,5 Ampère,
Resultierender Strom = 10 Ampère, dann ist
der Wattlose Strom = ∾ 9,9 Ampère

und das ist jener Strom, der hier im Produkt Ampèrewindungen den ersten Faktor bildet. Der erwähnte Apparat erhält also 10 Ampère × 100 Volt, verbraucht 150 Watt und verursacht eine Phasenverschiebung von circa 81°.

Ein Schnitt in den Ring verursacht die Einschaltung eines Luftwiderstandes für den magnetischen Kreis, und falls derselbe den Widerstand des letzteren verdoppelt, sind nicht mehr 9,9, sondern 19,8 Ampère nötig, um gleiche Wirkung zu erzielen.

Der Konsum im Kupfer wird statt 10 Watt jetzt circa 40 Watt betragen, da der Strom jetzt rund 20 Ampère sein wird.

Der durch die gröfsere Stromstärke verursachte Spannungsverlust veranlafst jetzt ein Sinken des Magnetismus gegen den früheren um circa 1 %. Wir haben dann annähernd 138 Watt Verlust im Eisen und 40 Watt Verlust im Kupfer, zusammen 178, was bei 100 Volt etwa 1,78 Ampère Wattstrom repräsentiert. Bilden wir damit wieder das Diagramm, so erhalten wir einen resultierenden Strom von 20,6 Ampère und eine Phasenverschiebung von 8°. Den resultierenden Strom und die Phasenverschiebung können wir demnach leicht berechnen, wenn wir den magnetischen Widerstand und somit die Ampèrewindungen bezw. den Erregungsstrom, ferner die Verluste im Apparate, den Wattstrom, bestimmt haben.

Man darf übrigens nicht unberücksichtigt lassen, dafs der Wechselstrom im Vergleiche zum Gleichstrome zwei Werte hat.

Bei elektrolytischen Zwecken entspricht der erhaltene Niederschlag dem „arithmetischen Mittel" aus den verschiedenen Stromstärken (nach der Kurve berechnet). Bei den anderen Zwecken gilt das „geometrische Mittel". Wird die Kurve spitzer als die Sinuskurve, so wird auch das geometrische Mittel verhältnismäfsig gröfser gegenüber dem arithmetischen. Die Kurve kann theoretisch so spitz werden, dafs das geometrische Mittel $\left(\sqrt{\frac{J^2}{2}}\right)$ sehr grofs, während das arithmetische Mittel nahezu gleich Null wird; d. h. dann ist ein solcher Wechselstrom wohl zu Beleuchtungs-, nicht aber zu elektrolytischen Zwecken verwendbar.

Magnetische Wirkungen sind immer nach dem arithmetischen Mittel zu beurteilen.

Nach G. Kapp ist die „effektive" EMK von Wechselstrom-Maschinen

$$e_f = k \cdot p \cdot s \cdot N \frac{n}{60} \cdot 10^{-8},$$

wenn p die Polzahl,

s die Zahl der wirksamen Drähte,

N die Kraftlinienzahl eines Poles und

k einen Koeffizienten bedeutet, der von der Polbreite und der Spulenbreite abhängig ist.

Bezeichnet d die Entfernung der Mitten zweier benachbarter Pole entgegengesetzter Polarität (Fig. 25), bezw. die halbe Entfernung, wenn gleichnamige Pole aufeinander folgen, s die Breite

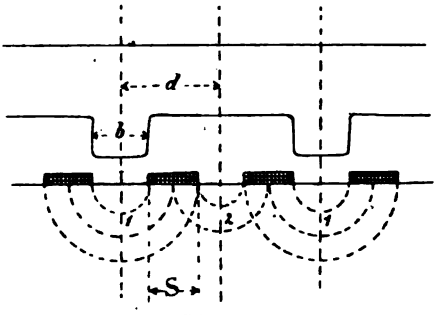


Fig. 25.

der Wickelung einer Spule b die lineare Dimension des induzierenden Polstückes in der Bewegungsrichtung, so hat (nach G. Kapp) k folgende Werte:

Nr.	Wenn $\frac{b}{d}$	und $\frac{s}{d}$,	dann ist k
1	1,00	0,00	1,00
2	1,00	1,00	0,58
3	1,00	0,50	0,82
4	0,62	0,50	2,06
5	0,50	1,00	1,64
6	0,50	0,50	2,31
7	0,33	0,33	2,83
8	Sinuskurve		2,22.

Es giebt zwei Arten, um bei unipolarer Anordnung einen einfachen Wechselstrom zu erzeugen: entweder setzt man die Spulenzahl der Zahl der induzierenden Polansätze gleich, oder man nimmt doppelt so viel Induktionsspulen als Polansätze.

Ist nun z. B. I $s = b = d$, dann ist $k = 0{,}58$,

II $\frac{b}{d} = 0{,}5$ und $\frac{s}{d} = 0{,}5$, dann ist $k = 2{,}31$.

Letzterer Wert ist noch mit $\sqrt{2}$ zu dividieren, weil dabei zwei um 90° verschiedene Phasen mit $\frac{z}{2}$ Drähten in Serie geschaltet werden und man erhält

$$\frac{2{,}31}{\sqrt{2}} = 1{,}64\,,$$

d. i. ein Wert für k, der auch dem Werte 5 obiger Tabelle entspricht, wenn

$$\frac{b}{d} = 0{,}5 \text{ und } \frac{s}{d} = 1.$$

Wir schliefsen daraus, dafs bei Konstruktionen für die Praxis der Fall II vorteilhafter als Fall I ist.

Bei den gewöhnlichen mehrpoligen Maschinen steht bekanntlich jeder Induktionsspule ein induzierender Polansatz gegenüber, und man erhält aus sämtlichen Spulen einen gleichphasigen Strom.

Konstruktion der Wechselstrom-Maschinen.[1])

Nach der Art der Erregung der Feldmagnete kann man die Wechselstrom-Maschinen einteilen:

1. in solche mit permanenten Magneten,
2. in solche mit Elektromagneten, die aus einer besonderen Elektrizitätsquelle erregt werden, und
3. in sogenannte selbst erregende Maschinen.

Die hauptsächlichsten Typen der Gruppe 1 wurden schon auf Seite 17 erwähnt.

Die Maschinen der Gruppe 2 unterscheiden sich von denen der Gruppe 1 nur dadurch, dafs statt der permanenten Magnete Elektromagnete gebraucht werden, deren Drahtwindungen mittels Gleichstrom aus einer passenden Dynamo, oder aus einer Akkumulatorenbatterie oder sonst einer konstanten Elektrizitätsquelle gespeist werden.

Die Maschinen der Gruppe 3 sind so konstruiert, dafs man einen Teil der Armaturspulen abzweigt, den Strom kommutiert und mit diesen die Elektromagnete erregt.

Die älteren Maschinen bezw. jene, welche vor der Erfindung des Grammeringes gebaut worden sind, erzeugten die elektromotorische Kraft dadurch, dafs die rotierenden Spulen das konstante Kraftlinien-Feld durchschnitten, während die neueren

[1]) Bei allen Beschreibungen der nach dem Jahre 1891 konstruierten Maschinen für einfachen Wechselstrom sind Hinweise auf das Drehfeld und die mehrphasigen Wechselströme zu finden. Es schien hier nicht angezeigt, diese Hinweise auszuscheiden, wenn auch das Drehstrom-System in diesem Buche erst später beschrieben wird.

Typen dadurch elektrische Spannung liefern, dafs fortwährend Dichteänderungen des Kraftlinien-Feldes veranlafst werden.

Wie bei Gleichstrom-Maschinen verwendet man auch hier in der Armatur Ring-, Trommel- oder Scheibenwickelung und wir können beobachten, dafs es bei Wechselstrom-Erscheinungen von grofsem Einflufs ist, ob sich im Bereiche des magnetischen Feldes Eisenmassen vorfinden oder nicht. Man verwendet daher auch meistens Maschinen mit möglichst wenig Eisen. Infolge dieses Umstandes greift man auch wieder auf die allerersten Typen von Wechselstrom-Maschinen zurück, und stellt die Armaturspulen fest, während die Magnete bewegt bezw. rotiert werden.

Es kann nicht unsere Aufgabe sein, hier als Einleitung zu unserem Thema alle einfachen Wechselstrom-Maschinentypen zu besprechen, und es sollen nur einzelne Konstruktionen deswegen etwas eingehender erörtert werden, weil wir aus denselben zur Erläuterung des Drehstrom-Systemes das entnehmen wollen, was für die zugehörigen Konstruktionen als Basis gedient hat, und was zu Vergleichen dienen kann. Der besondere Vorzug der Wechselstrom-Maschinen besteht darin, dafs durch den Fortfall schleifender Kollektorkontakte ein funkenloser Betrieb erzielt wird, wodurch man der Schwierigkeit besonders guter Isolierung teilweise überhoben ist. Gleichstrom-Maschinen werden wegen dieser Schwierigkeit kaum über 1000 Volt leisten können, während bei Wechselstrom-Maschinen 2000 Volt mit Leichtigkeit erreicht werden.

Man vermeidet im allgemeinen heutzutage in elektrischen Maschinen Teile zu bewegen, welche hohe Spannungen haben und man transformiert die hochgespannten Ströme lieber entweder gleich nach der Erregung oder kurz vor ihrer Ausnutzung, doch hat die Erfahrung gezeigt, dafs es sich bei Verwendung hoher Spannungen in den Leitungsdrähten allerdings empfiehlt, kleinere Motoren hinter Transformatoren zu stellen, dafs es aber vorteilhaft ist, grofse Motoren für Hochspannung zu bauen und direkt in die Hochspannungs-Leitungen einzubinden, besonders wenn auch hier die Teile, welche hohe Spannung führen, stillstehend angeordnet werden können. Die Anschaffungskosten verringern sich dadurch, die Anlage wird vereinfacht.

Bei Wechselstrom empfiehlt es sich immer Polansätze zu verwenden, und es sollen Armaturen nicht gleichmäfsig verteilt, sondern konisch bewickelt werden. Die eng aneinander liegenden Scheiben der

Windungen beeinträchtigen die Wirkung nach aufsen, weil die Ströme in denselben entgegengesetzte Richtung haben. Bei einem Wechselstrom-Motor heben sich die Wirkungen dieser Spulenteile auf; bei Wechselstrom-Dynamos beteiligen sie sich nur wenig an der elektromotorischen Erregung.

Wechselstrom-Maschinen sollen viele Magnetpole haben, um eine hohe Wechselzahl bei geringer Tourenzahl zu erreichen.

Ganz & Comp., sowie die Firma „Helios" in Köln-Ehrenfeld haben schon im Jahre 1886 Nebenschlufs-Maschinen für Gleichstrom zur Erregung von Wechselströmen verwendet.

Das bezügliche Schema ist in Fig. 26 dargestellt. Im magnetischen Felde NS liegt ein Grammescher Ring. Rotiert man letzteren, so werden in der bekannten Weise elektrische Gleichströme erregt. Verbindet man aber zwei Punkte der unendlichen Spirale mit zwei auf der Welle isoliert sitzenden Ableitungsringen, so ist klar, dafs nach den Magneto-Induktionsgesetzen infolge der Rotation dieser Armatur im magnetischen Felde Wechselströme entstehen müssen, welche durch Bürsten abgenommen und zur weiteren Ausnutzung als einphasige Wechselströme den Leitungen zugeführt werden können.

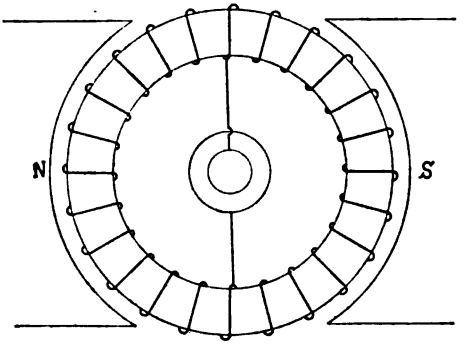


Fig. 26.

In Fig. 27 ist der Stromsammler a einer zweipoligen Gleichstrom-Maschine dargestellt. Dabei ist angenommen, dafs die Bürsten $b\,b$ das magnetische Feld der Maschine parallel zu dem Induktor schalten, d. h. es ist das Nebenschlufs-System in dieser Maschine durchgeführt. Zwei gegenüberliegende Lamellen des Stromsammlers (Kollektors) sind mit zwei isolierten Schleifringen, welche sich mit der Armaturwelle drehen, leitend verbunden; (nach der Zeichnung die Lamelle c mit dem isolierten Ring d, und die Lamelle e mit dem isolierten Ring f).

Bei mehrpoligen Maschinen sind alle Induktorspulen, welche

zu gleichnamigen magnetischen Feldern gleiche Lage haben, unter sich leitend zu verbinden, u. zw. entweder durch leitende Verbindung der betreffenden Spulen selbst, oder ihrer Zuleitungsdrähte nach dem Kollektor, oder der entsprechenden Lamellen des letzteren.

Führt man einer mit der angegebenen Schaltung versehenen Gleichstrom-Maschine vermittelst der Schleiffedern *g* und *h* Wechselstrom zu, so fängt die Armatur an sich langsam zu drehen; dabei ist der Stromzufluſs infolge der elektromotorischen Gegenkraft ein minimaler. Die Tourenzahl steigt jedoch sehr rasch und mit ihr der Stromzufluſs, bis die Umdrehungs-

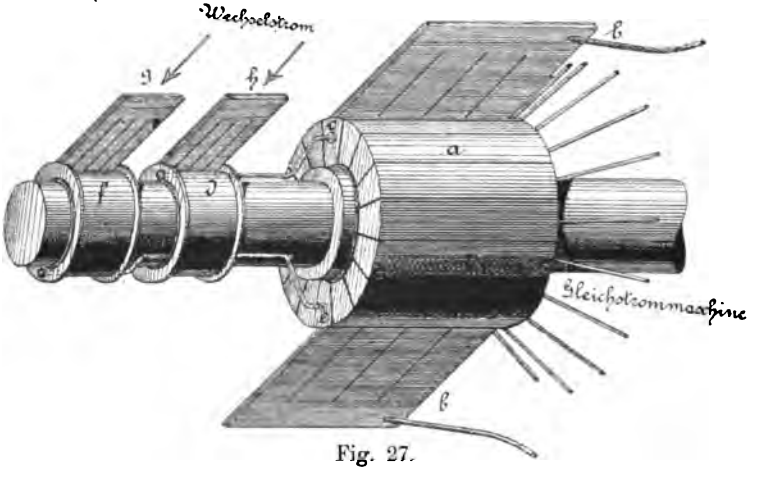


Fig. 27.

geschwindigkeit der Maschine in das richtige Verhältnis zu der Anzahl Wechsel des Wechselstromes gekommen ist. Eine vierpolige Maschine, welcher derart Wechselstrom von 4000 Impulsen in der Minute zugeführt wird, erreicht damit 1000 Umdrehungen der Armatur. Hat die Maschine diese normale Tourenzahl erreicht, so führt sie sowohl in ihrem Induktor als auch im magnetischen Felde Gleichstrom. Diese Anordnung wurde der Firma „Helios“ patentiert, und dient dieselbe nicht allein zur Kraftübertragung vermittels Wechselstromes, sondern auch zum Betriebe von Gleichstrom-Lampen und zu galvanoplastischen Zwecken. Um Hauptstrom- oder Verbundgleichstrom-Maschinen zu solchen Zwecken des Wechselstrom-Betriebes umzuschalten, sind ähnliche Verbindungen am Kollektor erforderlich.

Eine eigentümliche Konstruktion finden wir in der Wechselstrom-Maschine von Mordey, welche von der Brush-Comp. gebaut wird. Diese Maschine findet man sehr häufig in praktischer Verwendung. Sie besteht aus zwei Hauptteilen: Eine Anzahl klauen-

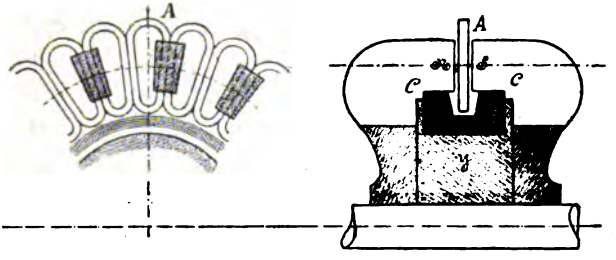


Fig. 28.

förmig gebogener Eisenstücke C (Fig. 28 und 29) laufen von der Maschinenwelle ausgehend derartig radial zusammen, dafs immer ein Ende einer Klaue (N) dem anderen von der zweiten Seite kommen-

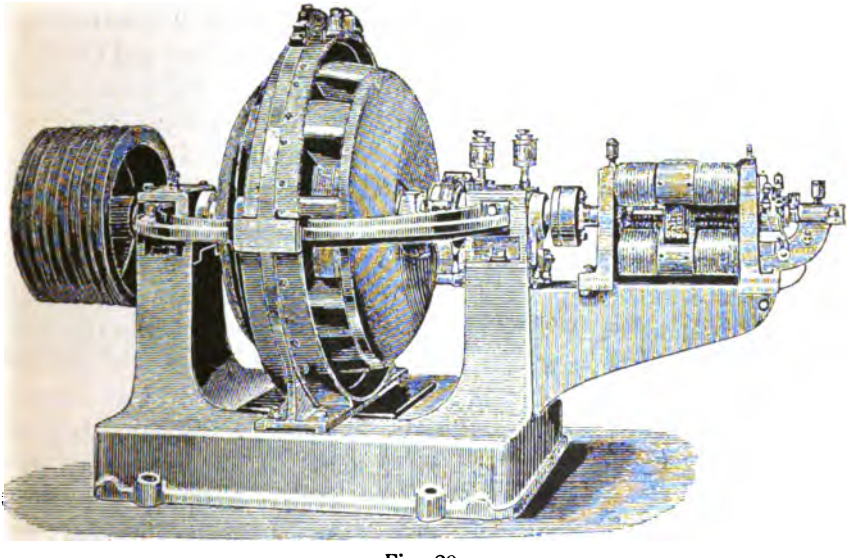


Fig. 29.

den (S) gegenüber liegt, so dafs ein entsprechender Spalt entsteht. Diese Klauen bilden die rotierenden Feldmagnete und zwischen ihnen steht die aus einem mit der Grundplatte fest verbundenen Ringe bestehende Armatur, welche doppelt so viel Spulen ent-

hält, als Eisenklauen vorhanden sind. Die Spulen sind auf keilförmigen Porzellanplatten aufgewickelt, bestehen aus Kupferband und sind leicht auswechselbar befestigt, so dafs bei einem etwaigen Durchschlagen nicht die ganze Armatur abgewickelt werden mufs. Auf jeder Seite des Ringes befindet sich je ein Satz Spulen. Der feststehende Ring selbst füllt den oben erwähnten Spalt, so dafs die Erregerwickelung von den Eisenklauen eingeschlossen ist. Wenn nun im Eisen durch die für alle Klauen bestimmte einzige Multiplikationsspirale S_1 magnetischer Kraftflufs veranlafst wird, vollendet dieser seine Bahn über den Luftwiderstand des Spaltes und falls die Eisenmassen um die Armatur A rotieren, treffen die Kraftlinien auf die Spulen, in denen nun Induktionsströme erregt werden. Der kommerzielle Wirkungsgrad dieser Maschinen beträgt 90 %; bei geringer Belastung erfordern sie geringen Energieaufwand. Wenn aus einer solchen Maschine mit 2100 Volt 7 Ampère entnommen werden, so sinkt die Spannung erst bei einer Entnahme von 20 Ampère auf 2000 Volt.

Fig. 30 zeigt uns das Bild einer Kappschen Wechselstrom-Dynamo [1]), wie sie nunmehr dem von Herren Johnson und Phillips eingeführten Typus für Licht- und Kraftzwecke entspricht. Auch bei diesem Typus ist der Anker fest und das Feldmagnet-System dreht sich. Das letztere besteht auch aus zwei Stahlgufsstücken mit klauenförmigen, radialen Strahlen und mit dazwischen liegender Erregerspule, wodurch entgegengesetzte Polarität auf wechselnden Polarflächen erzeugt wird. Der Anker besteht aus so vielen Segmenten, als Pole vorhanden sind; jedes Segment wird von Armen aus (Kanonenmetall) Rotgufs und Stahlbolzen in einer äufseren Gufseisenschale (Gehäuse) gehalten und ist deshalb leicht zu ersetzen. Jedes dieser Segmente besteht aus einem Kern von Holzkohleneisen-Platten von solcher Gestalt, dafs es zwei longitudinale Auskehlungen (Rinnen) bildet, in welchen die Ankerwickelung angebracht ist. Die letztere kann vor dem Einsetzen der Ankerplatten auf der ganzen Oberfläche in jeder gewünschten Dicke isoliert werden und macht dadurch diesen Maschinentypus besonders geeignet für Kraftübertragung auf weite Entfernung bei hoher Spannung.

Eine Anlage dieser Art wurde kürzlich von Herren Johnson

[1]) Siehe auch Kittler, Handbuch der E., II. Band 1. Hälfte, Seite 189.

und Phillips für die Sheba Gold Mines in Süd-Afrika hergestellt, wo Kraft mittelst Zweiphasen-Strom von 3300 V. auf eine Entfernung von 5 Meilen übertragen wird. An der Erzeugerstation, wo Wasserkraft vorhanden ist, sind zwei 132 Kw. Zweiphasen Wechselstrom-Maschinen von dem in Fig. 30 illustrierten Typus aufgestellt und an der Motorstation wird die Spannung durch

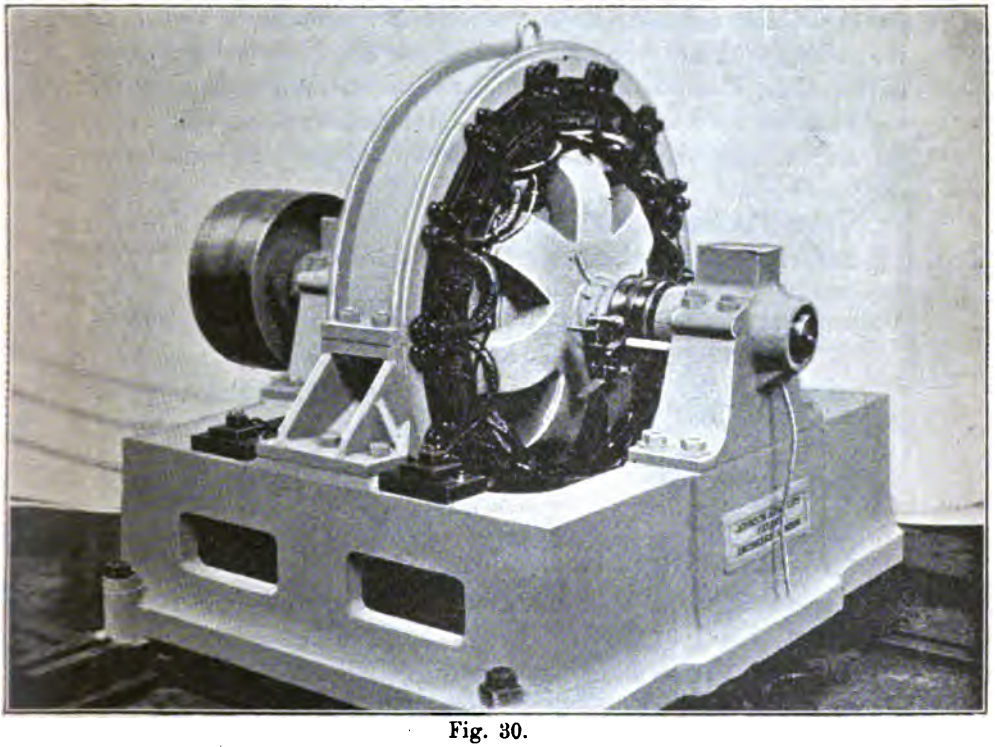


Fig. 30.

Transformatoren auf 100 Volt reduziert. Mit dieser niedrigen Spannung werden dann die verschiedenen Motoren gespeist, welche die Stempel und andere Maschinen treiben.

Die Tafel I zeigt eine 600pferdige Wechselstrom-Dynamo verbunden mit der entsprechenden Dampfmaschine nach der Anordnung, wie sie von der Firma „Helios“ ausgeführt wird.

Konstruktion der Wechselstrom-Motoren.

E. Hospitalier hat über „Wechselstrom-Motoren“ in der Société de Physique einen Vortrag gehalten, dem wir folgendes entnehmen [1]):

Ein Wechselstrom-Motor unterscheidet sich dem allgemeinen Prinzip nach nicht wesentlich von einem Gleichstrom-Motor. Man findet bei ihnen immer dieselben beiden wesentlichen Teile, ein magnetisches Feld oder Magneten und ein induziertes System oder Anker, die sich gegeneinander drehen. Während aber das magnetische Feld der Gleichstrom-Motoren konstant bleibt, ist das der Wechselstrom-Motoren je nachdem konstant, oscillierend oder drehend.

Herr E. Hospitalier giebt folgende Klassifikation der gegenwärtig existierenden Wechselstrom-Motoren:

Motoren mit konstantem Felde oder synchrone Motoren.

Separate Erregung { Magnete — Magnetomaschinen. / Elektromagnete Dynamomaschinen.

Selbsterregung { Gleichgerichteter Strom — Zipernowski.

Motoren mit oscillierendem Felde.

Dynamo-Hauptschluſs-Motoren für Gleichstrom mit Blättermagneten.

Dynamo-Nebenschluſs-Motoren für Gleichstrom mit Blättermagneten.

Elektrodynamische Motoren — Elektrizitätszähler E. Thomson.

Teilweise gleichgerichtetes Feld — Mordey.

Geschlossener Anker — E. Thomson.

Der oben Genannte giebt folgende weitere Erklärungen:

Motoren mit konstantem Felde. Diese am frühesten versuchte Art von Motoren gründet sich auf das Prinzip der Umkehrbarkeit der wechselnden Ströme. Der Wechselstrom wird in eine Reihe induzierter Spulen geschickt, welche sich in einem durch einen Magneten oder Elektromagneten konstant gehaltenen

[1]) Siehe E. T. Z. 1891, Heft 36, Seite 481.

magnetischen Felde drehen. Der einfachste Motor dieser Art wird gebildet von der Doppel-T-Spule von Siemens, die sich zwischen den Schenkeln eines Magneten oder eines von einer äufseren Quelle erregten Elektromagneten dreht. Hat man vorher den Anker auf eine der Periode des von der Wechselstrom-Maschine gelieferten Wechselstromes entsprechende Winkelgeschwindigkeit (50 Touren per Sekunde z. B., wenn die Polwechselzahl des Wechselstromes 50 ist) gebracht, so setzt sich die Bewegung der induzierten Spule synchron fort und folgt allen Geschwindigkeitsänderungen der Wechselstrom-Maschine, wofern man nicht plötzlich auf die Welle eine einen bestimmten Wert übersteigende Belastung wirft, wo dann der Synchronismus aufhört und der Motor in einer im allgemeinen sehr kurzen Zeit stehen bleibt. Die Theorie dieser Motoren wurde im Jahre 1884 von Dr. Hopkinson entwickelt. Die Notwendigkeit, im Anfang erst den Synchronismus herbeizuführen und die Magnete durch eine äufsere Quelle im Falle grofser Kraftleistungen zu erregen, sowie das Erfordernis einer absolut konstanten Umdrehungsgeschwindigkeit haben es verhindert, dafs diese Motoren zahlreiche industrielle Anwendungen erlangen konnten. Zipernowski hat zwei der schwersten diesen Motoren anhaftenden Uebelstände beseitigt, indem er dieselben selbsterregend machte, wobei der Erregerstrom einem Nebenschlufs entnommen wurde, in welchen ein Stromwender eingeschaltet wurde. Der Motor setzt sich automatisch in Gang, vorausgesetzt, dafs man die Belastung wegläfst und dafs die Ingangsetzung bei Leerlauf stattfindet; derselbe erhält schnell seine normale Geschwindigkeit, welche er sodann vollkommen beibehält, trotz plötzlicher Änderungen in der Belastung. Der Wirkungsgrad dieser Motoren ist ein sehr befriedigender, denn er erreicht 0,8 bei einem Motor von 4 Kilowatt. Trotz des zum Betriebe dieser Motoren erforderlichen Synchronismus haben dieselben verschiedene Anwendungen für Kraftübertragungen gefunden. Die Fig. 31 zeigt uns das Prinzip eines synchronen Wechselstrom-Motors.

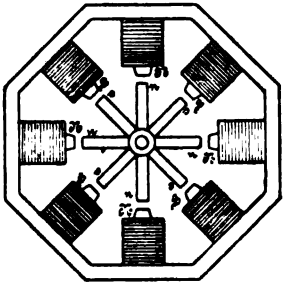


Fig. 31.

Motoren mit oscillierendem Felde. Jede mit Wechsel-

strömen gespeiste Gleichstromdynamo kann in Gang kommen und sich drehen, wobei sie eine wahrnehmbare mechanische Kraft erzeugt. Dieselbe ist nämlich einem Elektrodynamometer vergleichbar, dessen Torsionsmoment immer von demselben Zeichen ist, trotz der Umkehrungen der Richtung des Stromes. Indessen bietet ein derartig gebildeter Motor zahlreiche und schwere Übelstände dar. Die schnellen Umkehrungen des Stromes entwickeln in den Magnetkernen Wirbelströme, die den Wirkungsgrad des Motors beträchtlich herabdrücken, wenn man nicht die Vorsicht gebraucht hat, diese Magnete aus Lamellen herzustellen. Der grofse Selbstinduktions-Koeffizient der Stromkreise des Motors vermindert die wirksame Intensität und somit die spezifische Leistungsfähigkeit eines Motors von gegebenen Dimensionen.

Aus diesen Gründen sind die Motoren dieser Art wenig in Gebrauch, aufser für geringe Leistungen. Wir erwähnen hier beispielsweise die Motoren, welche kleine Hausventilatoren betreiben, die 1 bis 2 Ampère bei einer wirksamen Spannungsdifferenz von 50 Volt verbrauchen, Apparate, die gegenwärtig in Amerika viel angewendet werden. Die Erregung dieser Motoren geschieht bald durch Nebenschlufs, bald durch Hauptschlufs. Durch Weglassung des Eisens in den Magneten und den Ankern kann man ebenfalls einen elektrodynamischen Motor von geringer spezifischer Leistungsfähigkeit herstellen, dessen Bewegungsmoment aber in jedem Augenblicke dem Produkte der Stromstärken, welche respektive die Magnete und den Anker durchfliefsen, proportional ist. Der Motor des Elektrizitätszählers von Prof. Elihu Thomson ist der Typus der elektrodynamischen Motoren.

Um die Verluste durch Wirbelströme und Hysteresis, welche aus den schnellen Umkehrungen der Magnetisierung in den Magneten der Motoren mit oscillierendem Felde entstehen, zu vermeiden, hat Herr Mordey vorgeschlagen, den Wechselstrom durch einen auf der Achse des Motors selbst montierten zweiteiligen Kommutator zu schicken. Im Augenblicke der Ingangsetzung ist die Wirkung dieses Kommutators gleich Null, in dem Maafse aber, wie die Drehungsgeschwindigkeit wächst, wird der den Motor durchfliefsende Strom mehr und mehr gleichgerichtet, d. h. die Häufigkeit der Umkehrungen nimmt ab, was die durch diese Umkehrungen verursachten Verluste reduziert und den Wirkungsgrad verbessert.

Zur Klasse der Motoren mit oscillierendem Felde mufs man auch die Motoren mit geschlossenem Anker rechnen. Die Versuche des Prof. Elihu Thomson über elektrodynamische Repulsionen haben gezeigt, dafs ein geschlossener Stromkreis, in ein oscillierendes Feld gesetzt, sich derart zu verschieben sucht, dafs sein gegenseitiger Induktionskoeffizient möglichst klein wird, d. h. derart, dafs der durchdringende Kraftstrom ein Minimum wird. Setzt man in dieses oscillierende Feld eine Reihe von Elementarspulen, die um eine gemeinsame Achse beweglich sind, und wird durch ein passend angeordnetes System von Bürsten jede der Spulen in dem Augenblicke kurzgeschlossen, wo der durch sie hindurchgehende Kraftstrom ein Maximum ist, und in dem Moment, wo der Kraftstrom gleich Null wird, der Kurzschlufs wieder aufgehoben und die Spule so lange offen gehalten, bis der Kraftstrom von neuem ein Maximum wird, so unterliegt jede der Spulen einer Kraft und erzeugt somit ein Drehungsmoment, welches durch die Vielheit der Spulen nahezu konstant gemacht wird. Bei diesem Motor besteht keine Verbindung zwischen dem Strome im Magneten und dem Ankersystem. Der Magnetstromkreis ist metallisch geschlossen durch die vom Stromerzeuger herkommenden Leitungen; der Ankerstromkreis ist in sich selbst geschlossen. Der Versuch läfst sich mit einer kleinen zweipoligen Gramme- oder Rechniewski-Maschine leicht ausführen, indem man dafür Sorge trägt, dafs die Bürsten etwa um 45° in der Rotationsrichtung verstellt werden. Die Motoren mit oscillierendem Felde werden wenig gebraucht und bisher sind Versuche, welche ihren Wirkungsgrad erkennen liefsen, nicht veröffentlicht worden.

Betrachten wir nun einige praktische Ausführungen:

Der Wechselstrom-Motor von F. J. Patten[1]).

Denken wir uns einen Grammeschen Ring mit acht Spulen und dementsprechend acht Kollektorsegmenten. Bei Einführung von Gleichstrom mittels der gebräuchlichen Bürsten rotiert der Anker, falls derselbe in einem konstanten, magnetischen Felde gelagert ist. Führt man aber Wechselstrom ein, so werden die Ringpole bei jedem Stromwechsel geändert und wenn ein direkter

[1]) „Elektrotechnische Zeitschrift", Heft 5, Jahrgang 1890, Seite 72 ff.

Impuls im äufseren Stromkreise die Pole n und s hervorruft, so erzeugt der folgende entgegengesetzte Impuls die entgegengesetzten Pole s_1 und n_1 an den gleichen Punkten. Deshalb wäre die Bewegungstendenz auch die entgegengesetzte, wenn das Feld konstant bliebe, dagegen die gleiche, wenn auch das Feld sich umkehrte (Tafel II Fig. 1, 2, 3 und 4).

Bleibt jedoch das Feld konstant, und vertauschen wir die Stellung der Bürsten b_1 b_2 durch irgend eine Anordnung bei jedem Stromwechsel, so können auch die Ringpole konstant erhalten werden, weil dann ein direkter vom Zuführungspunkte (Klemme) A_2 nach rechts ausgehender Impuls durch die Bürste b_1 in den Ring gelangen, die beiden Ringhälften herabfliefsen und über b_2 nach A_1 zurückkommen; während ein indirekter Stromimpuls von A_1 aus nach links wieder zu der Bürste b_1 gelangen würde, welche jetzt mit b_2 getauscht hat. Diese Vertauschung der Bürsten läfst sich durch die in Fig. 1, Tafel II, dargestellte Anordnung vornehmen. Von den acht Kommutatorsegmenten sind die mit ungeraden Zahlen versehenen wie vorher mit den Armaturspulen verbunden, während die zwischenliegenden mit geraden Zahlen bezeichneten Segmente zu den diametral liegenden Anschlufspunkten des Ringes geführt sind. So ist z. B. Segment 2 mit d, Segment 4 mit g verbunden. Falls jetzt eine Wechselstromquelle an A_1 und A_2 angelegt wird, und der Ring sich während jedes Stromwechsels um einen Bogen entsprechend jenem der Sektorbreite des Kommutators bewegt, so werden wir an den oberen und unteren Enden des Ringes konstante Polarität ohne eine mechanische Lagenänderung der Bürsten erhalten.

Wenn nun während eines Stromwechsels ein Kollektorsegment unter den Bürsten passiert, können die in Fig. 1, Tafel II, dargestellten Verbindungen $c\,c$, $d\,d$, $f\,f$ irgend welche Form haben und es können auch andere Segmente zwischen ihre Enden eingeschaltet werden, ohne ihre Funktion zu stören.

Dieser Schritt ist in Fig. 2, Tafel II, dargestellt, wo in jede dieser Verbindungen ein weiteres Kollektorsegment $1\,c$, $2\,d$, $3\,f$, ... zwischengeschaltet ist. Aus Gründen der Deutlichkeit ist der zweite Kollektor aufserhalb und die Stromquelle innerhalb des ersten Kollektors dargestellt. Da die Pole des Ringes konstant erhalten werden, ist es möglich, von diesem zweiten Kollektor einen Stromkreis von konstanter Stromrichtung für die Magnete abzu-

zweigen, welchen Fall Fig. 3, Tafel II, für 12 Spulen darstellt. Wenn wir auch hier zwei entgegengesetzte Stromimpulse durch einfache, bezw. doppelte Pfeile darstellen und den einen verfolgen, so passiert derselbe von A_1 zu dem Segmente 1 des inneren Kollektors, teilt sich nach rechts und links im Ringe gegen n und durch die Bürste b_3 um das Feld, setzt sich dann wieder bei dem Segmente 7 des inneren Kollektors zusammen und gelangt bei A_2 zur Stromquelle zurück. Wenn sich dann die Armatur um die Breite eines Kollektorsegments gedreht hat, geht der entgegengesetzte Impuls von A_2 aus, gelangt von b_2 aus jetzt auf das Segment 8 des inneren Kollektors, von da durch die diametrale Verbindung zum Segmente 12 des äufseren und zur Bürste b_3. Hier tritt wieder die Teilung des Stromes ein, wobei das Feld in demselben Sinne wie zuvor vom Strome umflossen wird. Der Erregerstrom des Feldes gelangt von der Bürste b_4 nach dem Segmente 8 des äufseren und 12 des inneren Kollektors, auf welch letzterem jetzt die Bürste b_1 schleift. Die beiden Stromimpulse von entgegengesetzter Richtung passieren also Armatur und Magnete in der gleichen Richtung und erzeugen somit eine konstante Bewegungstendenz Die Maschine geht ohne Belastung von selbst an, und gewinnt so lange an Geschwindigkeit, bis die Bedingung erfüllt ist, dafs für jeden Stromwechsel ein Kommutatorsegment unter den Bürsten hingleitet. Dann erreicht die elektromotorische Kraft im Motor ihr Maximum und der Motor bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit mit maximaler Zugkraft.

Beim Angehen der Maschine werden selbstverständlich rasche Umdrehungen der Polarität in allen Eisenteilen hervorgerufen werden, und es ist deshalb wesentlich, dieselben genügend zu unterteilen.

Fig. 4, Tafel II, zeigt ein Schema der ausgeführten Maschine. Sie besteht nur aus einer in sich geschlossenen Armatur in einem einfachen Felde, $c\,c$ ist der gewöhnliche Kollektor, von welchem die Bürsten $b_3\,b_4$ einen Strom von konstanter Richtung zur Speisung der Feldmagnete entnehmen, $a\,c$ ist der invers verbundene Kollektor, dessen Bürsten $b_1\,b_2$ zu den Klemmen der Wechselstromquelle geführt sind.

Die Versuche, elektrische Maschinen, welche nach denselben Grundsätzen hergestellt sind, wie die Elektromotoren für Gleich-

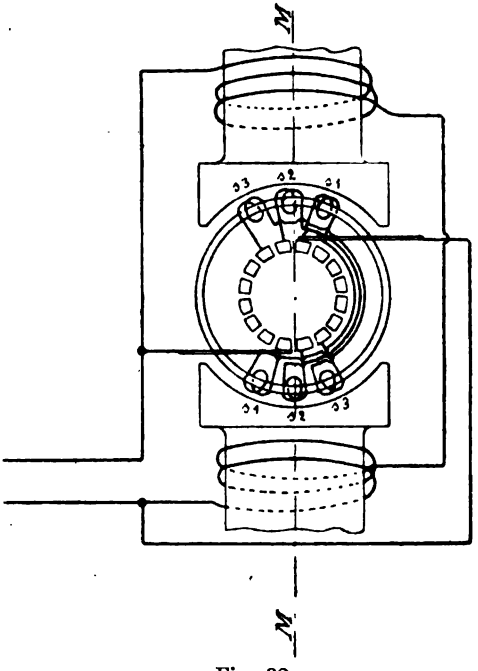


Fig. 32.

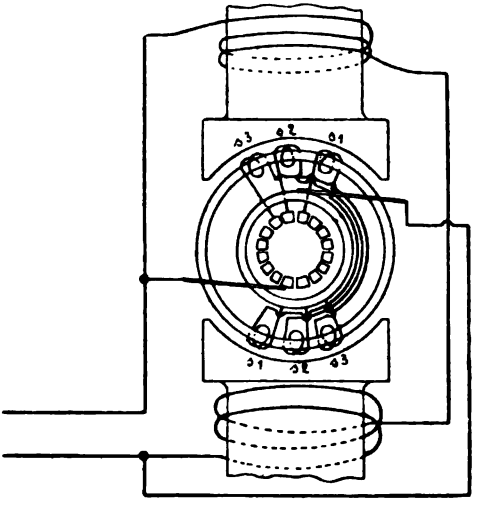


Fig. 33.

ströme, in brauchbarer Weise als Elektromotoren auch für Wechselströme zu verwenden, waren stets vergeblich. Sie blieben auch dann erfolglos, als man die Feldmagnete zur Verhütung von Wirbelströmen aus Eisenblechen zusammensetzte.

Der Grund dieser Erfolglosigkeit liegt darin, dafs der gewöhnliche Anker für den Betrieb mit Wechselströmen nicht geeignet erscheint; ferner dafs die Verwendung der mittels Wechselstromes erregten Feldmagnete im Nebenschlusse unzweckmäfsig ist, wenn nicht ganz bestimmte Verhältnisse zwischen Ankerwickelung und Magnetwickelung obwalten.

Die Übelstände, welche bei Betrieb der gewöhnlichen elektrischen Maschinen mit Wechselströmen auftreten, sollen nach einem der Firma „Helios“ erteilten Patente durch folgende Anordnungen beseitigt und somit wirksame Elektromotoren für Wechselströme hergestellt werden, die, wie die Firma Helios seiner Zeit angegeben hat, sich selbst regeln und lenken lassen.

Der Anker wird nach dem Schema Fig. 32 oder 33 hergestellt. Die Wickelungen sind nicht sämtlich zusammenhängend, wie gewöhnlich, sondern es werden die beiden Enden einer Spirale oder einer Gruppe von parallel oder hintereinander geschalteten Spiralen, die in Bezug auf die Magnetfelder symmetrisch liegen, mit zwei entsprechenden (in der Darstellung diametral gelegen) Stegen des Stromwenders verbunden, isoliert von den übrigen Spiralen und Stegen. Zwei oder auch mehr solcher Spiralen oder Spiralgruppen werden durch die Bürsten parallel geschaltet. Es ist zweckmäfsig, dafs die Bürsten gleichzeitig in mehrere Spiralen Strom senden.

Bei dieser Anordnung schalten die Bürsten nur solche Stromkreise mit einander parallel, in welchen ungefähr gleiche elektromotorische Kräfte herrschen.

Es ist zweckmäfsig, dafs die einzelnen nach diesem Gesetze gebildeten Spiralgruppen möglichst über den ganzen Umfang des Ankers verteilt seien. Dies kann durch die Anordnung nach Fig. 34 erreicht werden.

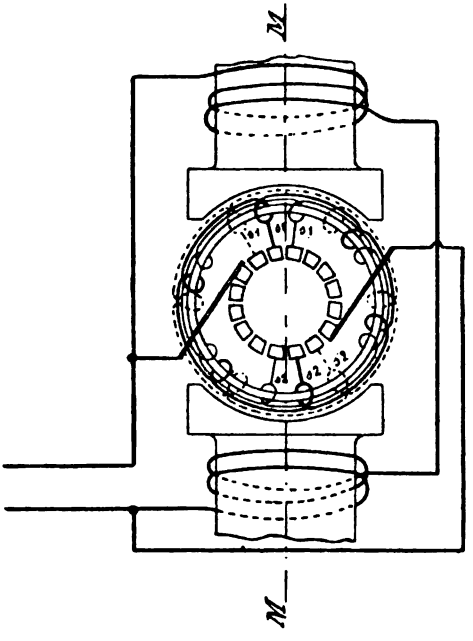


Fig. 34.

Auf den Anker wird nämlich jede einzelne Drahtlage kontinuierlich in der Art der Gramme-Armatur aufgewickelt. Bestimmte Punkte einer jeden solchen Wickelung werden in symmetrischer Anordnung in Bezug auf die Magnetpole mit Stromwenderstegen verbunden (in Fig. 34 je zwei Punkte s_1 und s_2 bei jeder Bewickelung).

Diese Verbindungsstellen der einzelnen Drahtlagen oder Wickelungen sind um einen bestimmten Winkel gegeneinander verdreht, so dafs diese Stellen aller Wickelungen möglichst um den ganzen Umfang des Ankers verteilt erscheinen. Wenn z. B. durch Strom-

wender und Bürsten bei den Verbindungsstellen Strom in eine Spirale geleitet wird, so entstehen bei den Verbindungsstellen Folgepole.

Eine andere Art der Ankerbewickelung ist in Fig. 35 dargestellt. Das leitende Gesetz ist dasselbe wie bei der früheren Anordnung, wo die einzelnen Spiralgruppen den ganzen Umfang des Ankers oder einen grofsen Teil des Umfanges bedecken. Jede Spiralengruppe hat in gleichen Abständen Umkehrstellen (in diesem Falle doppelt so viel als Magnetpole). An diesen Stellen setzt man die Bewickelung auf dem Anker in umgekehrter Richtung fort, so dafs, wenn bei einer solchen Umkehrstelle ein Strom — etwa durch Bürsten und Stromwender — ein- oder austritt, der Strom vor und hinter der Umkehrstelle den Anker im demselben Sinne umfliefst; wo jedoch der Strom durch eine Umkehrstelle hindurchgeht, mufs er die Richtung in Bezug auf die Ankeroberfläche ändern, es mufs also hier ein magnetischer Pol am Anker entstehen, eine Art von Folgepol. Solche Spiralgruppen werden mehrfach in mehreren Lagen hergestellt, wobei die Umkehrstellen einer jeden Gruppe um einen bestimmten Winkel gegen die Umkehrstellen einer anderen Gruppe vorgeschoben werden. Bei den betreffenden Umkehrstellen werden die Spiraldrähte mit den voneinander isolierten Stegen des Stromwenders verbunden, in einer solchen Reihenfolge, dafs während der Ankerdrehung ebenso wie bei der Anordnung Fig. 32 bis 35 mehrere Ankerwickelungen gleichzeitig mit den stromführenden Bürsten in Verbindung kommen und die Spiralgruppen nacheinander Strom erhalten und wirksam sind.

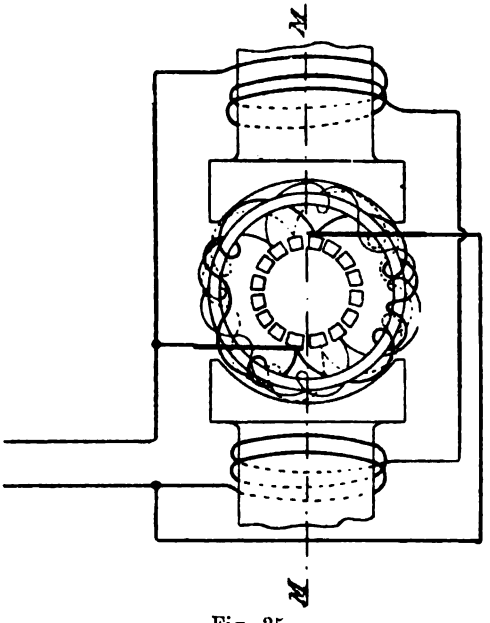


Fig. 35.

Weil bei den beschriebenen Konstruktionen des Ankers dessen induzierte Spiralen durch die Bürsten nur parallel und niemals hintereinander geschaltet werden, ist noch die in Fig. 33 dargestellte Vereinfachung möglich. Man kann nämlich von den zwei Verbindungsdrähten einer jeden Spiralengruppe je eine zu dem betreffenden Stege des Stromwenders und die andere zu einem gemeinschaftlichen Schleifringe oder einer ähnlichen Stromschlufsvorrichtung führen. Selbstverständlich werden auch in diesem Falle die Verbindungen am Stromwender an dessen ganzem Umfange möglichst gleichmäfsig erteilt. Der Stromwender hat dann auch nur so viel Stege, als Wickelungen oder Spiralgruppen am Anker vorhanden sind. Man braucht dann nur eine isolierte Bürste, währenddem die andere Stromzuführung durch eine ununterbrochene Verbindung erfolgen kann.

Bei allen diesen Konstruktionen durchfliefst der Arbeitsstrom immer solche Ankerspiralen, welche die Magnetpole im Anker um einen entsprechenden Winkel gegen die Pole der Feldmagnete verschoben hervorbringen, um ein starkes Drehmoment zu bewirken.

Der Umstand, dafs während der Ankerdrehung jede Ankerspirale nur vorübergehend von Strom durchflossen, dann aber bis zur folgenden Berührung mit der Bürste stromlos ist, bringt es mit sich, dafs die zeitweilige Stromdichte in den Ankerdrähten unvergleichlich gröfser sein kann, als in den Drähten eines gewöhnlichen Ankers, wenn bei beiden die gleiche Erwärmung, bezw. der gleiche Energieverlust zugelassen wird. Dadurch kann man bei dieser Anordnung, ob zwar hier immer nur ein Teil der Ankerwickelung thätig ist, dennoch eine hohe Wirksamkeit des Elektromotors erzielen.

Was die Stromführung und den Betrieb des Elektromotors anbelangt, so ist von der Beobachtung ausgegangen worden, dafs der Anker bei Wechselstrom zweierlei Induktionswirkungen ausgesetzt ist; erstens ist es die Induktion, welche er seitens der Feldmagnete wegen der wechselnden magnetischen Intensität erfährt, und zwar ganz unabhängig von seinem Stillstande oder seiner Drehung; zweitens die Induktion, welche er infolge seiner Drehung im magnetischen Felde erfährt und welche von der Geschwindigkeit der Drehung abhängig ist. In Fig. 36 sind die aus der einen oder anderen Induktion folgenden elektromotorischen Kräfte, welche in den Spiralen eines solchen Ankers auftreten,

graphisch dargestellt, indem die Abscissen (im Umfange eines Quadranten bezw. einer Bogenhälfte zwischen zwei Magnetpolen) die Bogenlänge des Drehkreises, die Ordinaten aber die elektromotorischen Kräfte en^0, en^1, en^2, en^3 u. s. w. bezeichnen.

Es ist ersichtlich, dafs die elektromotorische Kraft infolge der ersten Art von Induktion em am gröfsten ist bei o, d. h. in der Mitte des Magnetfeldes MM und Null bei 90°, d. h. inmitten zwischen zwei Magnetfeldern.

Die elektromotorische Kraft infolge der Drehung hingegen ist bei 90° am gröfsten und bei o Null. Die aus beiden resultierenden elektromotorischen Kräfte bilden eine Linie, deren Or-

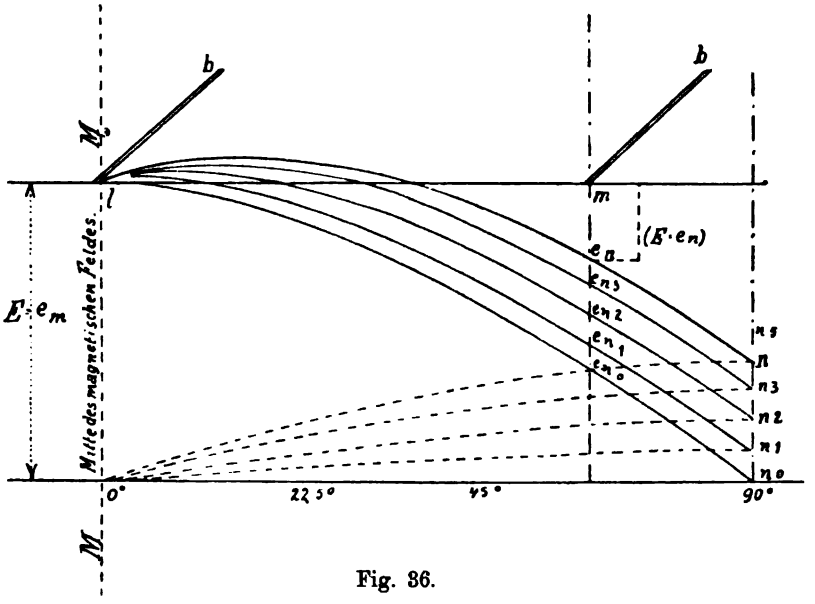


Fig. 36.

dinate bei o durch die Induktion beim Stillstand des Ankers, und deren Ordinate bei 90° durch die von der Drehungsgeschwindigkeit abhängige Induktion bestimmt ist.

So erscheinen die Diagramme der elektromotorischen Kräfte eines solchen zwischen zwei Magnetfeldern liegenden Umfanges des Ankers verschieden, je nach der Geschwindigkeit oder Umdrehungszahl n^0, n^1, n^2, n^3 u. s. w.

Als treibenden Strom wählt man einen solchen, dessen Spannung (E in Fig. 36, wo der besseren Übersicht wegen das eigent-

liche negative E im positiven Sinne dargestellt erscheint) so groſs oder ungefähr so groſs ist, als die elektromotorische Kraft des Ankers bei *o*. Es wird dann eine solche Stelle am Stromwender geben, und zwar entsprechend der Mitte MM des Magnetfeldes, wo der treibende Strom, in den Anker eingeführt, einer elektromotorischen Kraft begegnet, welche seiner eigenen Spannung gleich und entgegengesetzt gerichtet ist, wo also die Stromstärke des Schlieſsungskreises im Anker Null ist. Solche Stellen werden bei verschiedenen Drehungsgeschwindigkeiten auch an anderen Punkten des Umfanges zu finden sein, d. h. es wird jeder Geschwindigkeit noch eine zweite Bürstenstellung entsprechen, bei welcher sich die Stromspannungen gegenseitig aufheben, so daſs der Anker bei geschlossenem Stromkreise stromlos ist. Verschiebt man die Bürsten nach einer Richtung, dann wird die Spannung des eingeleiteten Stromes die Spannung des Ankerstromes überwiegen, und es entsteht entsprechend dem Unterschiede dieser Spannungen $E - en$ ein Arbeitsstrom im Schlieſsungskreise des Ankers, welcher den Anker in einem gegen die Magnetpole verschobenen Winkel magnetisiert und ein Drehmoment hervorruft.

Infolge dieser Betrachtungen und Versuche sind auch diejenigen Konstruktionsbedingungen gefunden worden, welche die Anordnung der Feldmagnete im Nebenschlusse nicht nur möglich, sondern sogar zweckmäſsig machen. Die Feldmagnete sind nämlich gewissermaaſsen der primäre Bestandteil eines Umwandlers, den sie mit dem Anker zusammen bilden; sonach setzen wir die Wickelungen auf den Feldmagneten und auf den Anker in ein solches Verhältnis, daſs die Stromspannung des Ankers bei MM infolge der Induktion gleich oder ungefähr gleich ist der Spannung des Stromes, der die Feldmagnete erregt, d. h. gleich mit der Arbeitsspannung $E = cm$; dadurch wird der Elektromotor in hohem Maaſse regel- und lenkbar.

Der Elektromotor kann aus dem Stillstand des Ankers in die gewünschte Bewegung versetzt werden, indem man die Bürsten aus der Nullstellung (bei MM, d. i. die stromlose Stellung in Fig. 36 bei *l*) allmählich in jene Stellung *m* verschiebt, wo der Spannungsunterschied $E - en$ hinreicht, um die erforderliche Drehkraft hervorzubringen. Bei zunehmender Drehgeschwindigkeit nimmt die elektromotorische Kraft des Ankers zu, man verschiebt demnach die Bürsten so, daſs abermals der erforderliche

Spannungsunterschied und dementsprechend die erforderliche Drehkraft vorhanden ist.

Verschiebt man die Bürste von der Nulllage in der entgegengesetzten Richtung, so wird eine Drehung des Ankers in umgekehrtem Sinne hervorgerufen. Endlich kann auch die Umsteuerung des Elektromotors durch allmähliche Überführung der Bürsten von der positiven auf die negative Seite bewerkstelligt werden, ohne daſs Stöſse in der Maschine oder Funken am Stromwender auftreten, indem man die Bürsten durch ihre Nulllage hindurch gehen läſst.

Durch das Stellen der Bürsten oder der Bürste kann der Elektromotor geregelt werden von der stromlosen Stellung, wo er keine, bis zu jener Stellung, wo er seine gröſste Kraft entwickelt. Es ist somit überflüssig, Widerstände in den Stromkreis des Ankers oder der Feldmagnete einzuschalten, daher wird auch die Regelung ebenso wie auch die Umkehr der Drehungsrichtung ohne Zuhilfenahme von unwirtschaftlichen Zwischenvorrichtungen möglich. Auch kann bei geringer Drehungsgeschwindigkeit und bei der Ingangsetzung ein starkes Drehmoment am Anker erzeugt werden, ohne Aufwendung einer bedeutenden elektrischen Energie, weil der Motor vermöge seiner Wirkungsweise als Stromwandler eine groſse Stromstärke bei geringer Stromspannung erzeugen kann und dann auch nur eine verhältnismäſsig geringe Energie verbraucht.

Der hier beschriebene Motor ist nämlich als Stromwandler mit zwei Primärströmen zu betrachten: dem Erregerstrome, welcher in die Magnetwickelung, und dem Arbeitsstrome, welcher in die Ankerwickelung gesendet wird. Letzterem Strome setzt sich der durch den Erregerstrom induzierte Sekundärstrom im Anker entgegen. Zur Beurteilung der in dem Elektromotor verbrauchten elektrischen Energie ist nebst der im Anker bestehenden Stromstärke, welche von dem Spannungsunterschiede $E - en$ abhängig und für die Stärke des Drehmomentes maaſsgebend ist, nicht die Spannung des Arbeitsstromes E zu berücksichtigen, wie bei anderen Elektromotoren, sondern der Spannungsunterschied $E - en^0$.

Man kann daher durch entsprechende Stellung der Bürsten zwischen o und 90^0 eine genügende Drehkraft bei Stillstand des Elektromotors hervorrufen, wobei nur so viel elektrische Energie aufzuwenden ist, als dem Widerstande der Ankerdrähte bei der

dem gewünschten Drehmomont entsprechenden Stromstärke zukommt. Diese Energie ist viel geringer als diejenige, welche bei gewöhnlichem Gange des Elektromotors unter Wirkung eines gleichen Drehmomentes aufgewendet wird. Unter Annahme des gleichen Drehmomentes verhält sich die elektrische Energie, welche im Stillstande, zu derjenigen, welche bei einer Geschwindigkeit n verbraucht wird, wie $(E - en) : (E - en^0)$, beide Werte gemessen an demjenigen Punkte, wo die Bürsten im letzteren Falle sich befinden (z. B. bei M in Fig. 36).

Die Wirkungsweise dieses Elektromotors, sowie die Wirkungen der Bürstenverstellung als Regelungs- und Steuerungsmittel sind demnach gänzlich verschieden von denjenigen, welche bei anderen Elektromotoren bekannt sind. Diese Art der Steuerung ist mit den vervollkommneten Steuerungen an Dampfmotoren zu vergleichen, bei denen die Expansion verändert wird, im Gegensatze zu den bisher angewendeten Steuerungsmethoden an Elektromotoren, die mit der Drosselung des Dampfes verglichen werden können.

Durch selbstthätige Stellung der Bürsten kann man die Geschwindigkeit, die Drehkraft u. s. w. des Elektromotors auch selbstthätig regeln, je nachdem entweder ein Geschwindigkeitsregler, ein Stromstärkeregler oder irgend eine selbstthätige Vorrichtung, welche für einen bestimmten Zustand oder eine bestimmte Leistung eingerichtet ist, die Bürstenbewegung beherrscht.

Wenn auch in den schematischen Figuren der einfachen Darstellung wegen zweipolige Vorrichtungen und Ringanker angenommen wurden, so ist es selbstverständlich, dafs sich eine ähnliche Anordnung ebenso auf mehrpolige Vorrichtungen, auf Trommel-, Flachring-, Scheiben- und beliebig geformte andere Anker, endlich auch auf Aufsen- und Innenpolmaschinen anwenden läfst.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat im Jahre 1893 einen Wechselstrom-Motor konstruiert, welcher aus einem Systeme von induzierenden Windungen besteht, in welche ein einfacher Wechselstrom von aufsen geleitet wird, und der ein System von kurzgeschlossenen Windungen enthält, in welchem von dem ersten Systeme Ströme induziert werden. Das eine der beiden Systeme ist drehbar angeordnet.

Das induzierende System erregt eine bestimmte Zahl von Magnetpolen, die ihren Zeichen nach abwechselnd auf einem Kreise liegen. Ein solcher Motor sucht bekanntlich eine dem synchronen Gange sich nähernde Geschwindigkeit anzunehmen, sobald einem der beiden Systeme gegenüber dem anderen eine gewisse anfängliche Geschwindigkeit erteilt ist. Diese Anfangsbewegung kann ihm mittels Hand oder durch irgend eine andere Antriebsvorrichtung gegeben werden. „Oerlikon“ wollte damit die Aufgabe lösen, dem Motor jede beliebige relative Geschwindigkeit zwischen beiden Systemen im Ruhe- und Bewegungszustande willkürlich durch Drehung von Schleifbürsten zu geben.

(Fig. 9 Tafel III.) Die magneterregenden Windungen sind auf einem Eisenringe so angeordnet, wie die Ankerwindungen einer Gleichstrom-Maschine, zwei- oder mehrpolig, mit Trommel- oder Ringwickelung. Die Windungen sind wie bei dem Anker einer Gleichstrom-Maschine an bestimmten Stellen mit den Stegen eines Stromwenders verbunden, auf welchem, wie bei der Gleichstrom-Maschine, eine bestimmte Zahl Bürsten schleifen. Die Verbindung der Windungen mit den Stegen, die Zahl derselben und der Bürsten, die Stellung der Bürsten gegeneinander ist ebenso wie bei der Gleichstrom-Maschine von der Zahl der Pole und der Art der Wickelung abhängig.

Die Bürsten des Wechselstrom-Motors dienen zur Zuführung des Stromes in die Windungen und können mittels einer beliebigen willkürlichen oder selbstthätig mit dem sich drehenden Teil des Motors verbundenen Drehvorrichtung um den Stromwender herumgedreht werden. Dadurch wird erreicht, dafs die von den induzierenden Windungen gebildeten Pole mit der Stromstärke des induzierenden Wechselstromes wechseln.

Die Wirkungsweise ist dabei folgende: Je nach der Stellung der Bürsten wird die Lage der von der Wickelung erregten Magnetpole auf dem Ringe geändert und die Richtung der magnetischen Kraftlinien um die Achse des Ringes verdreht

Da der Erregerstrom ein Wechselstrom ist, so strömen bei einer bestimmten Polstellung die Kraftlinien in einer Richtung hin und her und durch die Drehung der Bürsten wird die Richtung der Strömung verdreht. Durch eine Drehung der Bürsten erreicht man also eine Drehung des Erregersystemes bezw. seiner Pole gegenüber dem induzierten Systeme, d. h. die gleiche Wir-

kung, wie wenn man den umlaufenden Teil des Motors durch irgend eine Antriebsvorrichtung in Bewegung versetzt hätte. Die relative Bewegung zwischen beiden Systemen wächst mit der Drehungsgeschwindigkeit der Bürsten. Ist der Motor in Ruhe, so kann man durch Drehung der Bürsten diejenige Anfangsgeschwindigkeit zwischen beiden Systemen erzeugen, welche für das gewünschte Drehmoment erforderlich ist. Läuft der Motor mit einer gewissen Geschwindigkeit und werden zudem die Bürsten gedreht, so ergiebt die wirkliche Bewegung des Motors zusammen mit der durch die Bürstendrehung erzeugten Verschiebung eine resultierende relative Bewegung zwischen beiden Systemen, die je nach der Bewegungsrichtung der einzelnen Komponenten gleich der Summe oder Differenz der einzelnen Geschwindigkeiten wird. Da nun die Grenze der relativen Bewegung die des synchronen Ganges ist, wenn der Motor Arbeit leisten soll, so wird der Motor stets diejenige wirkliche Umdrehungszahl anzunehmen suchen, welche zusammen mit der Bürstengeschwindigkeit den angenähert synchronen Gang darstellt. Die Umdrehungszahl wird also je nach der Bürstengeschwindigkeit, die willkürlich geregelt werden soll, mehr oder weniger von dem Synchronismus abweichen, ohne dafs die Wirkungsweise des Motors von derjenigen bei synchroner Umdrehungszahl verschieden sein müfste.

Um den grofsen Stromverbrauch beim Angehen der Wechselstrom-Motoren zu vermeiden, hat die Maschinenfabrik Oerlikon eine Konstruktion mit Kurzschlufsvorrichtung geschaffen, welche den Zweck hat, Wechselstrom-Motoren mit grofser Anzugkraft bei geringem Stromverbrauche zu bilden und bei Verwendung von einphasigem Wechselstrom dem Anker zugleich die erforderliche Anfangsgeschwindigkeit zu erteilen.

In Fig. 1, Tafel III, ist als Anker A ein Grammescher Ring angenommen. Ebenso wie bei einer Gleichstrom-Maschine sind die einzelnen Spulen mit den Stegen eines Stromwenders C verbunden, auf welchem zwei Bürsten P_1 und P_2 schleifen. Beim Anlassen des Motors wird der Strom J_1 nicht nur dem Felde, sondern auch dem Anker zugeführt. Der Wechselstrom-Motor arbeitet jetzt bei richtiger Bürstenstellung wie ein Hauptstrom-Motor für Gleichstrom; der maximale Strom im Anker fällt stets mit dem maximalen Felde zusammen, der Motor wird daher unter günstigen Bedingungen und mit grofser Zugkraft angehen. Der

in den Stromkreis eingeschaltete Widerstand R gestattet eine Regelung der Stromstärke und der Zugkraft. Sobald der Anker sich dem synchronen Gange nähert, was in kurzer Zeit erfolgt, werden die Stromwenderstege unter sich kurz geschlossen. Hierzu dient ein auf der Welle verschiebbarer und von dieser isolierter Ring S, welcher mittels eines Hebels an die Stege gepreſst wird.

Der Strom geht jetzt unmittelbar von einer Bürste zur anderen, die Funkenbildung am Stromwender kommt ganz in Wegfall und der Anker arbeitet wie ein Kurzschluſsanker. Durch die Anwendung einer Kurzschluſsvorrichtung können die Bürsten nach Inbetriebsetzung auch ganz vom Stromwender abgehoben werden. Mittels eines Schwungkraftreglers kann das Ein- und Ausrücken des Kurzschluſsringes selbstthätig geschehen.

Es ist natürlich nicht nötig, daſs alle Spulen des Ankers mit dem Stromwender verbunden werden; es genügt, einen Teil derselben an die Stege zu führen. In Fig. 3, Tafel III, ist eine solche Anordnung dargestellt. Die Enden der Spulen $o\,o$ sind mit den Stegen verbunden, der Kurzschluſs derselben erfolgt nach Inbetriebsetzung des Motors wieder durch den Ring S. Die Enden der Spulen $p\,p$ sind dagegen kurz geschlossen. Die Spulen $o\,o$ und $p\,p$ sind nebeneinander, wie in Fig. 3, oder auch übereinander angeordnet. („Kurzschluſsanker“ siehe „Drehstrom-Motoren“.)

Im allgemeinen wird es nicht ratsam sein, die Spulen $p\,p$ kurz zu schlieſsen, denn bei der Inbetriebsetzung des Motors, d. h. bei ruhendem Anker wirken dieselben wie die sekundären kurz geschlossenen Windungen eines Stromwandlers, d. h. sie verzehren eine groſse Menge Energie, ohne etwas zum Antriebe des Motors beizutragen. Um diesen Übelstand zu vermeiden, führt man die Enden der Spulen $p\,p$ in eine zweite, auf der Achse sitzende Kurzschluſsvorrichtung und schlieſst sie erst kurz, nachdem der Anker eine gewisse Geschwindigkeit erlangt hat.

Um keine zu hohe Umdrehungszahl zu erreichen, wird man groſse Wechselstrom-Motoren stets mehrpolig ausführen. Die Verbindung der Spulen mit dem Stromwender kann in dem Falle nach einem Schema für Parallelschaltung oder Reihenschaltung geschehen. Letztere hat den Vorzug, daſs nur zwei Bürsten erforderlich sind; auch braucht man nicht sämtliche Stege kurz zu schlieſsen. Ist die Zahl der Polpaare $= n$ und die Zahl der

Stege $= z$, so genügt es, wenn $\frac{z+1}{n}$ Stege kurz geschlossen sind.

In Fig. 4, Tafel III, ist eine vierpolige Anordnung mit Reihenschaltung der Ankerstäbe dargestellt. Der Anker zählt am Umfange 26 Stäbe und der Stromwender hat 13 Stege. Schliefst man mit dem Ringteil S sieben Stäbe kurz, so bilden je vier Stäbe eine kurzgeschlossene Wickelung, z. B. a, 11′, 11, 5′, 5, b.

Es ist ohne weiteres klar, dafs die für einen Ringanker gegebenen Wickelungen mit Kurzschlufs-Stromwender auch für Trommel- und Scheibenanker verwendbar sind. Ebenso können die gegebenen Anordnungen umgekehrt werden, indem man den Anker festhält und das Magnetfeld sich drehen läfst. Anstatt die Ankerwickelung zum Antriebe des Motors in Reihe mit dem Feldstrome zu schalten, kann dieselbe auch im Nebenschlufs dazu liegen.

In Fig. 7, Tafel III, ist ein Schema mit dem Anker im Nebenschlusse dargestellt. Pr bedeutet die primäre, S_1 und S_2 die sekundäre Wickelung eines Stromwandlers. Die Feldwickelung liegt in dem einen Teil S_1 und die Ankerwickelung im anderen Teil S_2 der sekundären Wickelung. Die Kurzschlufsvorrichtung des Stromwenders ist so einzurichten, dafs beim Einschieben die Bürsten P_1 und P_2 selbstthätig abgehoben werden.

Ist der Anker mit zwei Wickelungen versehen, von denen die eine in sich kurz geschlossen und die andere mit den Stegen des Stromwenders verbunden ist, so können die sekundären Windungen S_2 allmählich aus dem Ankerstromkreise ausgeschaltet und zugleich die Windungszahl S_1 im Feldstromkreise erhöht werden.

In Fig. 8, Tafel III, ist diese Schaltung dargestellt. Die Feldwickelung liegt zwischen K und e_2. Das Stromschlufsstück K ist verschiebbar und das Verhältnis der Windungszahlen $S_1 : S_2$ dadurch veränderlich. Ist K bis nach e_2 verschoben, so sind die Bürsten P_1 und P_2 kurz geschlossen, der Anker wirkt jetzt wie ein Kurzschlufsanker; will man aber die Bürsten abheben, so mufs der Kurzschlufsring eingeschoben werden, somit würde diese zweite Wickelung des Ankers unwirksam sein.

Ein Anker mit Stromwender und Kurzschlufs-Vorrichtung kann bei Wechselstrom-Motoren auch in folgender Weise Verwendung finden:

Es wird nur dem Felde Strom zugeführt. Beim Anlassen des Motors werden die Bürsten miteinander kurz verbunden, oder es werden nur einzelne Stege kurz geschlossen, so dafs die Drähte des Ankers gruppenweise in Reihe geschaltet sind (Fig. 2, Tafel III). Erst nachdem der Anker eine gewisse Geschwindigkeit erlangt hat, werden alle Stege kurz geschlossen. Die zum Angehen erforderliche Stromstärke wird durch diese Antriebsweise vermindert.

Die Kurzschlufs-Vorrichtung kann auch bei Ankern von Ein- und Mehrphasen-Motoren, deren Wickelung nicht nach Art des Grammeringes hergestellt ist, Verwendung finden, z. B. bei einem gewöhnlichen Kurzschlufsanker, um sowohl den Widerstand als auch die Selbstinduktion desselben veränderlich zu machen. Der Anker wird zu dem Zwecke mit zwei oder mehr von einander unabhängigen Wickelungen nach Art der Ring- oder Trommelwickelung versehen, welche an dem Umfange des Ankers nebeneinander oder radial übereinander liegen. Die Enden von einer oder mehreren dieser Wickelungen werden mit den Stegen der Kurzschlufs-Vorrichtung verbunden, so dafs die betreffenden Wickelungen jederzeit in sich geschlossen und geöffnet werden können. In den Figuren 5 und 6 ist beispielsweise die Kurzschlufs-Vorrichtung für einen Kurzschlufsanker A mit Trommelwickelung und parallel geschalteten Drähten dargestellt. Fig. 5 (Tafel III) stellt die Vorderansicht, Fig. 6 die Rückansicht des Ankers dar. Der Anker ist mit zwei Wickelungen versehen. Die äufsere Wickelung W_1 ist auf beiden Seiten des Ankers durch Metallringe in sich kurz geschlossen. Die zweite, innere Wickelung W_2 ist nur auf der Rückseite (Fig. 6) geschlossen, auf der Vorderseite (Fig. 5) dagegen führen die Drahtenden zu den Stegen C. Erst durch Anpressen des Ringes S oder durch eine Anzahl Stromschlufsfedern oder eine andere passende Vorrichtung können sämtliche Stege C und damit die Wickelung W_2 kurz geschlossen werden. Werden mehrere Drähte der Wickelung W_2 in Reihe geschaltet, was sowohl bei Ring- als Trommelwickelung leicht ausführbar ist, so vermindert sich die Zahl der Stege C. Dieselbe Anordnung ist auch bei mehrphasigen Wechselstrom-Motoren verwendbar.

Der Synchronismus beim Wechselstrom-Betrieb.

Der synchrone Gang von zwei beweglichen Körpern ist ein wirklicher mechanischer Gleichgewichtszustand. Es ist ein Naturgesetz, dafs der Gleichgewichtszustand erst nach einer gewissen Anzahl von Schwingungen um die endgültige Lage erreicht wird.

Daher ist es sehr schwierig, Wechselstrom-Maschinen synchron gehen zu lassen, obwohl dieser Gang bekanntlich theoretisch möglich ist.

Aus dem Gesagten ergiebt sich, dafs es zur Erzielung des synchronen Ganges nicht genügt, die beiden Maschinen zu treiben, bis sie die dem Synchronismus entsprechende Geschwindigkeit erreicht haben, es mufs vielmehr während einer hinreichenden Zeit auf die beiden Maschinen dergestalt eingewirkt werden, dafs sie von dieser Geschwindigkeit genügend wenig abweichen, damit die Schwingungen aufhören können; hierin liegt eine Schwierigkeit für das Ingangsetzen. Andererseits verändert jede störende Ursache — und diese sind unvermeidlich von vielerlei Art vorhanden — das Gleichgewicht, welches sich erst nach neuen Schwingungen wieder herstellen kann und also sehr unbeständig wird.

Wenn die störende Ursache zu bestimmter Zeit wiederkehrt, wie z. B. der Vorbeigang einer Riemennaht, und wenn die Umlaufszeit der Dauer der natürlichen Schwingungen des Ankers merklich gleich ist, so kann der synchrone Gang niemals erhalten werden.

Aus diesen Gründen giebt es in der Praxis keine Wechselstrom-Maschinen, welche ideal synchron gehen.

Maurice Hutin in Paris und Maurice Leblanc in Raincy (Seine et Oise) haben ein Verfahren zur Herbeiführung und Aufrechterhaltung des synchronen Ganges von Wechselstrom-Motoren vorgeschlagen, und soll man mittels desselben die Wirkung, Wechselstrom-Maschinen leicht und sicher synchron in Gang zu setzen und in synchronem Gange zu erhalten, welches auch immer die Aenderungen der Inanspruchnahme und allgemein die störenden Ursachen sein mögen, erzielen können. Der Grundgedanke dieses Verfahrens ist der folgende:

In dem Grammeschen Ringanker *O* einer elektrischen Maschine (Fig. 5, Tafel II), der sich zwischen zwei induzierenden

Polen N und S dreht, werde der Strom an zwei um 180° voneinander entfernt gelegenen Punkten a und b mittels zweier Ringe und zweier fester Reiber A und B eingeleitet. Der Feldmagnet werde durch einen in seinen gewöhnlichen Stromkreis gesendeten Gleichstrom erregt, er trage aufserdem aber noch einen in sich selbst geschlossenen Stromkreis CDE.

Sendet man in den Anker O einen Wechselstrom von gleichbleibender Stärke und teilt diesem Anker eine allmählich wachsende Geschwindigkeit mit, so beobachtet man, dafs in dem Stromkreise CDE induzierte Ströme entstehen, welche zu einem auf den Anker O zurückwirkenden Kräftepaar Veranlassung geben.

Die Gröfse dieses Kräftepaares ist eine Funktion der Geschwindigkeit. Dieser Wert kann durch eine Kurve, wie die Fig. 37 andeutet, versinnbildlicht werden. Für die Geschwindigkeit Null ist das Kräftepaar Null; es wächst mit der Geschwindigkeit und erreicht den gröfsten Wert A bei einer Geschwindigkeit, welche kleiner als die dem Synchronismus entsprechende ist, letzterer aber sehr nahe kommt; es wird abermals Null, wenn der Synchronismus erreicht ist, oder genauer bei einer dem Synchronismus aufserordentlich naheliegenden Geschwindigkeit; es erscheint mit umgekehrtem Zeichen, sobald dieser Punkt überschritten ist, und erreicht einen neuen gröfsten, dem ersten entgegengesetzten Wert A' bei einer Geschwindigkeit, die wenig höher als diejenige des Synchronismus ist, um alsdann in dem Maafse, wie die Geschwindigkeit zunimmt, unbegrenzt bezw. unbestimmt abzunehmen. Es folgt daraus, dafs, sobald die Geschwindigkeit der Maschine dem Synchronismus genügend nahe gekommen ist, z. B. den Punkt A erreicht hat, das betrachtete Kräftepaar energisch bestrebt ist den synchronen Gang herbeizuführen und diesen, nachdem er erreicht ist, beständig aufrecht zu erhalten unter Korrektur der Abweichungen, welche in dem einen oder dem anderen Sinne stattfinden könnten.

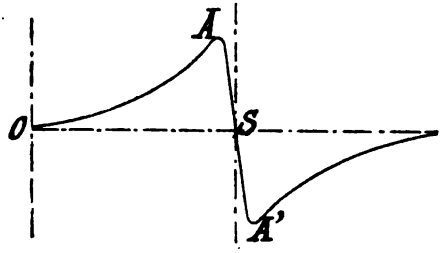


Fig. 37.

Das Kräftepaar dient also als Regler und als Dämpfer.

Anstatt anzunehmen, dafs der Anker O einen einzigen Stromkreis trägt und einen einzigen Strom empfängt, kann man voraussetzen, dafs er zwei Stromkreise trägt, deren Eintrittsstellen auf zwei rechtwinkelig zu einander stehenden Durchmessern gelegen sind, und welche von zwei hinsichtlich ihrer Phase verschobenen Strömen durchlaufen werden, so dafs der Anker O ein magnetisches Drehfeld erzeugen wird.

Die Wirkungen des als Dämpfer dienenden Stromkreises CDE auf jeden Stromkreis des Ankers finden dann in derselben Reihenfolge und demselben Sinne statt, so dafs die synchronisierende Wirkung nicht verändert wird. Sobald der synchrone Gang erreicht ist, dreht sich der Anker mit derselben Geschwindigkeit, aber in umgekehrter Richtung wie das Feld; das Feld wird also im Raume unbeweglich bleiben. Die Pollinie des Ankers wird dann eine bestimmte Lage sn, Fig. 38 einnehmen und mit der Pollinie N-S des induzierenden Feldes einen Winkel φ bilden. Dieser Winkel ist eine Funktion des widerstehenden Kräftepaares, welches der als Empfänger gehenden Maschine auferlegt ist. Wenn dieses Kräftepaar sich ändert, so erhält der Winkel φ einen anderen Wert und nimmt die Pollinie s-n eine neue Lage ein, in welcher sie nach einigen Schwingungen stehen bleiben mufs. Durch die Gegenwart des Stromkreises CDE werden diese Schwingungen begrenzt und sehr rasch aufgehoben, so dafs der Synchronismus aufrecht erhalten wird. Damit aber die dämpfende Wirkung kräftig und regelmäfsig sei, ist es offenbar nötig, dafs der Stromkreis CDE stets von den von dem Anker O ausgehenden Kraftlinien durchschnitten werde, welches auch immer die Lage der Pollinie s-n des Ankers sein möge. Dieser Stromkreis mufs also den Anker derart umgeben, dafs jede Verschiebung der Linie der Pole des Ankers zu einer Induktion Veranlassung giebt.

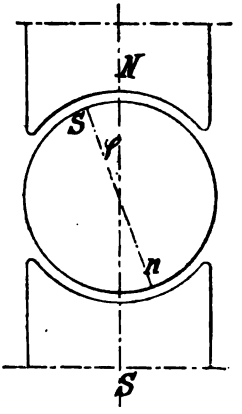


Fig. 38.

Um diesem Stromkreise die gröfste Wirksamkeit zu verleihen, ist es nötig, dafs die kleinste Verschiebung der Pollinie

in dem genannten Stromkreise die möglichst gröfste Energiemenge erzeugt.

Dies erheischt einerseits, dafs die induktive Wirkung, oder genauer ausgedrückt, die gegenseitige Induktion zwischen diesem Stromkreise und dem Anker so grofs wie möglich; andererseits der Widerstand dieses Kreises so klein wie möglich sei: Vor allen Dingen mufs die gegenseitige Induktion im Verhältnis zum Widerstande sehr grofs sein.

Man wird daher dem Dämpfungsstromkreise im allgemeinen die Gestalt eines den Anker umfassenden Leiters geben, welcher von einer grofsen Kupfermasse gebildet und in sich selbst geschlossen ist.

Diese Gestalt ist jedoch, wenngleich sie auch die beste ist, nicht unbedingt notwendig, sie kann vielmehr, vorausgesetzt, dafs der Stromkreis die erläuterten wesentlichen Eigenschaften bewahrt, nach Bedarf verändert werden; in diesen Stromkreis können nämlich zeitweilig oder dauernd Hilfsvorrichtungen, wie z. B. Kondensatoren, Widerstände oder Quellen elektromotorischer Kraft, eingeschaltet werden, welche in gewissen Fällen zur Erleichterung des Ingangsetzens der Maschine dienen oder zur Regelung ihres Ganges beitragen können.

Die Anwendung dieser Grundgedanken ist folgende: Es sei zunächst eine Wechselstrom-Maschine mit magnetischem Drehfeld, wie eine solche in Fig. 6 (Tafel II) schematisch dargestellt ist, betrachtet. Der feste Feldmagnet trägt zwei Stromkreise $A\,B$, der bewegliche Anker zwei Stromkreise $a\,b$. In die letzteren werden zwei hinsichtlich ihrer Phasen verschobene Ströme gesendet, welche ein Drehfeld erzeugen. In den einen A der festen Stromkreise leitet man einen Gleichstrom, der andere B bleibt wie bei der gewöhnlichen Arbeitsweise dieser Maschinen in sich selbst geschlossen.

Auf Grund dieser Vorkehrungen und des durch den Stromkreis B erzeugten treibenden Kräftepaares setzt sich die Maschine in Bewegung und erlangt eine Geschwindigkeit, welche derjenigen des Synchronismus sehr nahe kommt; man kann die Geschwindigkeit der Maschine der letztgenannten Geschwindigkeit dadurch beliebig nähern, dafs man den Stromkreis B passend einrichtet, besonders ihm eine bedeutende Kupfermasse giebt.

Unter diesen Bedingungen stellt sich der Synchronismus

rasch und mit Sicherheit her, die Maschine arbeitet dann so, wie mit Bezug auf Fig. 38 beschrieben wurde. Der Stromkreis *A* wirkt als Feldmagnet mit fester Polarität, der Stromkreis *B* dient als Dämpfer und erhält den Synchronismus aufrecht, welches auch die Aenderungen der Inanspruchnahme sein mögen.

Diese Einrichtung ist umkehrbar; man kann nämlich die verschobenen Ströme auch in die festen Stromkreise *A B* leiten, den Stromkreis *a* mit einem Gleichstrome speisen und den Stromkreis *b* in sich selbst schliefsen.

Der Dämpfungs-Stromkreis braucht übrigens, wie bereits gesagt wurde, nicht unmittelbar in sich selbst geschlossen zu sein; man kann in denselben gemäfs einem von den Konstrukteuren schon früher angegebenen Verfahren veränderliche Widerstände einschalten, um das Ingangsetzen zu erleichtern.

In diesen Stromkreis können ferner auch Kondensatoren und andere Vorrichtungen, welche sich zum Erleichtern des Ingangsetzens oder zum Regeln der dämpfenden Wirkung eignen, eingeschaltet werden.

Da der Dämpfungs-Stromkreis den Anker bezw. die induzierte Bewickelung vollständig umgeben und dieser so nahe wie möglich angeordnet sein mufs, würde man diesem Kreise ganz einfach die Gestalt eines den Anker umgebenden Kupferzylinders (wenn der Anker zylindrische Form hätte) oder von auf beiden Seiten des Ankers angeordneten Kupferscheiben (wenn der Anker selbst Scheibenform hätte) geben können. Diese Anordnung würde aber den Nachteil haben, den eisenfreien Raum in schädlicher Weise zu vergröfsern. Deshalb ersetzt man den zusammenhängenden Kupferzylinder bezw. die Scheiben durch eine Reihe von Stäben, welche man in den Polstücken des Feldmagneten unterbringt, also in Eisenmassen einbettet, und zwar den eisenfreien Raum so nahe wie möglich. Alle die in Bezug auf den Anker an einer und derselben Seite gelegenen Enden dieser Stäbe werden unter sich durch massive Stücke verbunden, in welche sie eingefügt sind. Die Maschine kann alsdann die folgende Gestalt erhalten:

Der Feldmagnet wird von einem Ring *A*, Fig. 7 und 8 (Tafel II), gebildet, der aus nebeneinandergestellten Blechplatten zusammengesetzt ist. Dieser Ring trägt den induzierenden und

den Dämpfungs-Stromkreis. Der erstere Kreis, der durch einen Gleichstrom oder gleichgerichteten Strom erregt wird, ist in der gewöhnlichen Weise von isolierten Drähten *B C*, *C D* gebildet, welche um die mit durchgehenden Kerben versehenen Bleche dergestalt gewickelt werden, dafs in dem Ringe eine Reihe abwechselnder Pole entstehen. Die in Fig. 7 und 8 (Tafel II) gezeigte Maschine weist acht Pole auf.

Der Dämpfungs-Stromkreis wird, wie vorhin angegeben, von Kupferbolzen *P P* gebildet, die mitten durch den induzierenden Kern gehen, von welchem sie durch isolierende Hüllen getrennt sind. Diese Bolzen werden unter sich vereinigt und in elektrische Verbindung gebracht durch zwei Bronzewangen *M M*, die zu beiden Seiten des Kernes *A* angeordnet sind und diesem gleichzeitig zur Versteifung dienen. Dieser Stromkreis ist mit dem Stromkreis *B C*, *C D* bedeckt, welcher den Gleichstrom aufnimmt. Die Bolzen *P P*, die den Dämpfungs-Stromkreis bilden, müssen dem Anker so nahe wie möglich angeordnet und rings um diesen so verteilt werden, dafs sie in allen Stellungen von den vom Anker ausgehenden Kraftlinien durchschnitten werden. Die nahe dem äufseren Umfang dargestellten Bolzen *P'*, Fig. 7 (Tafel II), dienen mit zum sicheren Zusammenhalten des Ganzen.

Der Gleichstrom, der den induzierenden Stromkreis *B C*, *C D* speist, kann von einer beliebigen Quelle, z. B. von einer kleinen, auf der Achse angebrachten Maschine *D* geliefert oder durch eine geeignete Gleichrichtung von Wechselströmen gewonnen werden, eine Gleichrichtung, die sich genau erlangen läfst, da die Maschine einen synchronen Gang hat.

Was den beweglichen Anker anbetrifft, so weist dieser ebenso wie der feste Feldmagnet acht Pole auf. Im Falle der Anwendung von verschobenen Strömen zur Erzeugung eines Drehfeldes werden diese Pole gemäfs dem gewöhnlichen Verfahren durch eine Anzahl über- oder nebeneinander liegender Stromkreise gebildet, die gleich ist der Anzahl der in Thätigkeit gesetzten, verschobenen Ströme; also zwei Stromkreise, die sich in der Mitte des magnetischen Feldes, d. h. des zwischen zwei gleichnamigen Polen gelegenen Raumes, kreuzen, wenn zwei Ströme, ein Sinus- und ein Kosinusstrom, angewendet werden; drei Stromkreise, die je auf ein Drittel des magnetischen Feldes verteilt sind, wenn drei verschobene Ströme angewendet werden, u. s. w.

Jeder dieser Stromkreise empfängt einen der Ströme, durch deren gleichzeitige Wirkung das Drehfeld gemäfs dem bekannten Verfahren erzeugt wird.

Die Maschine arbeitet alsdann in der Weise, wie oben (siehe Tafel II, Fig. 6) gesagt wurde.

Nach dem auf Seite 65 gegebenen Grundgedanken ist aber zur Erzeugung der dämpfenden Wirkung des induzierenden Stromkreises ein Drehfeld nicht nötig, diese Wirkung findet nämlich auch unter dem Einflusse eines einzigen Wechselstromes statt. Man könnte also, wenn man über einen einzigen Strom verfügt, auf dem Anker der Maschine einen einzigen Stromkreis (Fig. 9, Tafel II) anbringen, welcher natürlich die Entstehung einer der Anzahl der induzierenden Pole gleichen Anzahl Pole veranlassen müfste, ebenso, wie dies in Fig. 7 (Tafel II) angedeutet ist. In diesem Falle setzt sich die Maschine nicht mehr von selbst in Gang, es ist daher nötig, dieselbe anzutreiben und ihr künstlich eine Geschwindigkeit mitzuteilen, welche derjenigen des Synchronismus gleich oder sehr nahe ist.

Bei Gegenwart des Dämpfungs-Stromkreises genügt es aber, dafs die Maschine die Geschwindigkeit des Synchronismus erreicht, um darin zu verharren. Der einfachste Weg wäre also der, die Maschine zuerst mit einer beliebigen gröfseren Geschwindigkeit anzutreiben und darauf von selbst die passende Geschwindigkeit erreichen zu lassen. Die Maschine bildet alsdann eine gewöhnliche Wechselstrom-Maschine, welche nur in ihrer Form von den bekannten abweicht.

Das beschriebene Verfahren zur Erzeugung des synchronen Ganges ist allgemein anwendbar auf alle als Motor oder als Erzeuger dienenden Maschinen. Bekanntlich können die Wechselstrom-Maschinen nur dann in einem und demselben Stromkreis zusammen arbeiten, wenn sie sich synchron drehen. Die erläuterten wesentlichen Einrichtungen, die den Zweck haben, die von dem Anker erzeugten Kraftlinien zu zwingen, einen äufseren in sich selbst geschlossenen Stromkreis von sehr schwachem Widerstande zu schneiden, müssen immer beibehalten werden. Nur die Einrichtungen dieses Stromkreises ändern sich mit den verschiedenen Maschinenarten.

Es ist klar, dafs die angedeuteten Einrichtungen die Anwendung des Verfahrens nicht erschöpfen; wie schon gesagt, kann

man die Art der Anwendung umkehren, d. h. den Dämpfungsstromkreis, anstatt auf dem festen Teil, auf dem beweglichen Teil der Maschine anbringen, wenn der Anker fest und der Feldmagnet beweglich ist. Überdies kann diesem Stromkreise jede passende Einrichtung gegeben und derselbe in mehrere Stromkreise geteilt werden, wenn es nur die oben erläuterten wesentlichen Bedingungen erfüllt.

„Schuckert" hat sich s. Z. ein Verfahren patentieren lassen, nach welchem der Synchronismus in Wechselstromtreib-Maschinen konstatiert werden kann. Die Fig. 39 zeigt die bezügliche Anordnung. Man denke sich z. B. eine Flachring-Maschine, deren Anker zwei in der Phase um 90° verschobene Ströme zugeführt werden, während ihre Feldmagnete entweder durch Gleichstrom von einem an derselben Maschine befindlichen Stromabgeber unmittelbar oder durch eine Stromsammler-Batterie erregt werden.

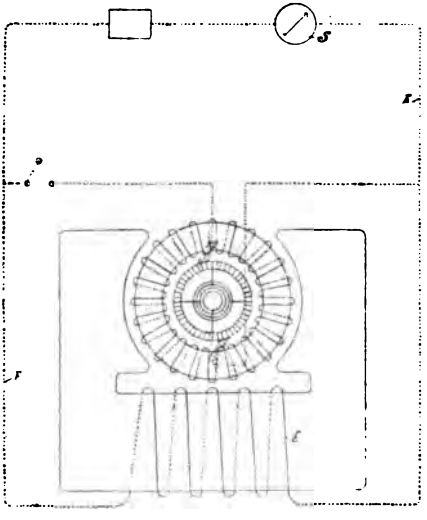


Fig. 39.

Die Anordnung ist also synchron.

Um nun die Vorteile des leichten Anlaufes bei asynchroner Schaltung zu benutzen, wird die Maschine beim Anlauf ohne Erregung der Feldmagnete eingeschaltet.

Der Anker beginnt jetzt sich schneller zu drehen, bis Synchronismus erreicht ist, worauf die Erregung der Feldmagnete vorgenommen wird. Wann dieser Augenblick eingetreten ist, soll wie folgt konstatiert werden:

Ist der Synchronismus erreicht, so sind die magnetischen Pole des Ringes und der Feldmagnete in relativer Ruhe; anders verhält es sich bei dem asynchronen Laufe. Bei demselben tritt ein Zurückbleiben des Ringes, also Voreilen des Poles ein, und

zwar richtet sich dessen Gröfse nach der Belastung. Bei Konstruktionen nach dem Beispiel der beschriebenen Flachringanordnung wird durch das Drehen der Pole in den Spulen der nicht eingeschalteten Feldmagnete eine elektromotorische Kraft induziert, deren Gröfse von der Abweichung vom Synchronismus abhängig ist. Ein in den kurz geschlossenen Erregerstromkreis *E* geschalteter Spannungsmesser *S* kann diese Induktion und folglich das Abweichen vom Synchronismus messen.

Anfänglich wird derselbe einen grofsen Ausschlag geben, der mit der Annäherung an den Synchronismus abnimmt. Zeigt das Instrument auf Null (oder annähernd auf Null), so ist dies ein Zeichen, dafs die Feldmagnete zu erregen sind, worauf der synchrone Gang unmittelbar eintritt.

Eine neue Anordnung hat die Maschinenfabrik Örlikon in letzterer Zeit bezüglich des Angehens der Wechselstrom-Motoren

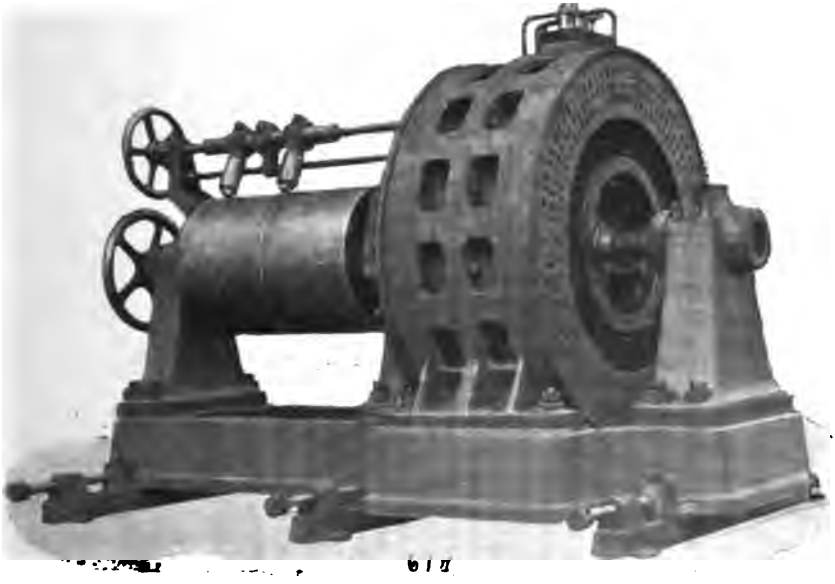


Fig. 40.

getroffen und ist dieselbe aus der Fig. 40 ersichtlich. Diese Fabrik geht von dem Standpunkte aus, den Motor immer leer anlaufen zu lassen; sie versieht letzteren mit einer doppeltbreiten Riemenscheibe,

und auf dem Vorgelege ist eine Voll- und Leerrolle angebracht. Es ist nun vorgekommen, dafs bei etwas zu straff gespanntem Riemen der Motor gar nicht angelaufen ist und mit der Hand nachgeholfen werden mufste. Um dies zu verhüten, werden jetzt die Motoren von $^3/_4$ PS. und darüber mit je einem dritten Lager und mit Voll- und Leerscheibe ausgestattet, wie aus nebenstehender Figur zu ersehen ist. Im dritten Lager ist ein Stift eingesteckt, auf welchem die Leerscheibe sitzt. Bei der Inbetriebsetzung kann nun der Motor leer anlaufen; hat er seine normale Geschwindigkeit und regelmäfsigen Gang erreicht, so wird die Leerscheibe vermittels des Handrades aufserhalb des dritten Lagers an die Vollscheibe angedrückt und von der letzteren mitgenommen. Läuft sie nun ebenfalls mit der normalen Tourenzahl, so wird der Riemen auf die Vollscheibe geschoben und die Leerscheibe wieder zurückgedreht.

Summieren der Wechselströme.

Werden in einem Stromkreise zwei Dynamos für Wechselströme von verschiedener Induktanz eingeschaltet (Fig. 44), so werden die zwei Ströme i_1 und i_2 in der Phase von einander abweichen. In jenem Teile des Leiters jedoch, welcher von beiden

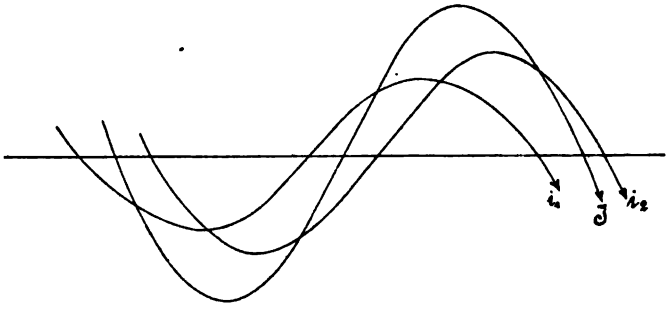


Fig. 41.

Strömen gleichzeitig durchflossen wird, summieren sich die beiden Ströme zu einem dritten Strome J, dessen Phase (Fig. 41) zwischen den beiden Phasen der Zweigströme liegt. Die mittlere Stromstärke von J ist in diesem Falle nicht gleich der Summe der mittleren Stromstärken von i_1 und i_2, sondern kleiner als diese Summe, weil i_1 und i_2 in gewissen Teilen der Periode zu einander entgegengesetzt gerichtet sind.

Je gröfser der Phasenabstand von i_1 und i_2, desto gröfser wird der Summenstrom J.

Die Summe zweier Wechselströme kann auch durch ein Kräfteparallelogramm dargestellt werden, und zwar so, wie dies in den Fig. 42 und 43 angedeutet ist. Aus dieser Darstellung erhellt, dafs bei sehr grofsem Winkel φ der Wert $J < i_1$ oder $J < i_2$ sein kann.

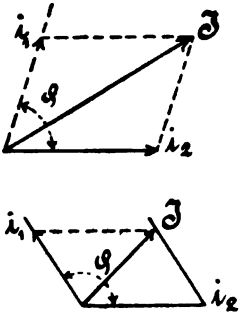


Fig. 42 u. 43.

Nach ähnlichen Darstellungen kann ein Wechselstrom in zwei Ströme zerlegt gedacht werden, von denen einer in seiner Phase mit der EMK zusammenfällt (d. i. der Wattstrom), während der andere um 90° hinter der Phase der EMK zurückbleibt (d. i. der wattlose Strom).

Um Wechselströme zu summieren, d. i. Wechselstrom-Maschinen parallel zu schalten, mufs:

1. gleiche Polzahl,
2. absolut gleiche Polwechselzahl und
3. genaue Deckung der Strom- und Spannungskurven verlangt werden.

Dies wird am besten erreicht, wenn man geometrisch und elektrisch gleiche Wechselstrom-Dynamos auf ein und dieselbe Motorwelle kuppelt.

Wechselstrom-Maschinen lassen sich also auf ein gemeinsames Leitungsnetz schalten, sobald dafür gesorgt wird, dafs die Umdrehungsgeschwindigkeit einer jeden so bemessen ist, dafs die parallel laufenden Maschinen die gleiche Polwechselzahl haben. Die Wechselstrom-Maschinen besitzen ferner die bekannte Eigenschaft, dafs sie, wenn parallel verbunden, eine gewisse regelnde synchronisierende Kraft auf einander ausüben, welche das „Aufsertrittkommen“ zu hindern sucht. Diese regelnde Wirkung besteht im wesentlichen darin, dafs eine Maschine, die aus Überflufs an zugeführter Kraft voreilen möchte, einen Strom in die zurückbleibende Maschine schickt, wobei sie mehr belastet und die andere entlastet, bezw. als Motor getrieben wird. Nun kann aber diese regelnde Wirkung unter Umständen, namentlich bei nicht passenden Erregungen der Maschinen, nicht immer stark genug sein, um die Maschinen mit Sicherheit in Tritt zu halten.

Haben die Maschinen ungleiche Bauart oder verschiedene Sättigungsgrade des Eisens, so ist es schwer, ja häufig unmöglich, bei wechselnder Belastung die für den synchronen Gang günstigste Erregungsstromstärke für jede Maschine einzustellen, denn vom Augenblicke an, wo die Maschinen zusammengeschaltet sind, hat man trotz Ablesung der gemeinschaftlichen Spannung keinen Anhaltspunkt zum Urteil darüber, ob und welche Maschine zu stark bezw. zu schwach erregt ist. Trotz der synchronisierenden Kraft kann es also doch vorkommen, dafs die Maschinen „aufser Tritt" kommen.

Die A. E.-G. hat 1892 ein Verfahren zum Verhindern des „Aufsertrittfallens" neben einander geschalteter Wechselstrom-

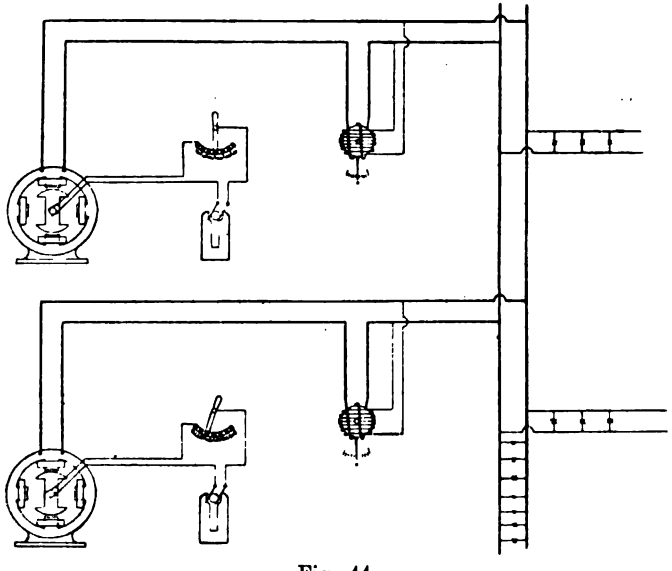


Fig. 44.

Erzeugermaschinen angegeben und beruht dasselbe darauf, die zwischen parallel laufenden Maschinen bestehende, regelnde Kraft dadurch zu unterstützen, dafs man für jede Maschine die passende Erregungsstromstärke für die ihr zugeführte, bezw. entnommene Leistung leicht ermittelt und herstellt (Fig. 44).

Man ging bei der A. E.-G. von folgenden Betrachtungen aus: Arbeitet eine Maschinenanlage auf ein induktionsfreies Leitungsnetz, so tritt keine Verschiebung der Phasen zwischen

dem in die Leitung fliefsenden Gesamtstrome und der Spannung ein. Haben nun die einzelnen Maschinen auch die für die Kraftzufuhr zu jeder, passende Erregung, so tritt bei denselben, einzeln betrachtet, auch keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ein. Ist aber eine der Maschinen zu stark oder zu schwach erregt, so tritt aufser dem in das Leitungsnetz fliefsenden Strome noch ein gewisser Betrag von Regelungsstrom zwischen den Maschinen dazu. Es wird dann der Strom bei der einen Maschine gegen die gemeinschaftliche Spannung wegen der Selbstinduktion etwas zurückbleiben bezw. der der anderen Maschine demgemäfs voreilen. Diese Phasenverschiebung läfst sich leicht entdecken, indem man eine nach Art eines zweiphasigen Drehstrom-Motors gebaute Anzeigevorrichtung so einschaltet, dafs die eine Spule derselben im Hauptstrome der Maschine, die andere Spule im Nebenschlusse hierzu liegt (s. Fig. 44): Diese Vorrichtung zeigt durch Drehung oder Ablenkung des Ankers nicht nur eine gröfsere oder kleinere Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung der Wechselstrom-Maschine, sondern auch, je nach Richtung der Ablenkung, ob der Strom in der Phase zurückbleibt oder voreilt. Entsprechend diesen Drehungen oder Ablenkungen kann man also sehen, welche Maschine in der Anlage bezüglich ihrer Erregung zu stark oder zu schwach ist. Man regelt demnach jede so lange, bis sämtliche Phasenzeiger möglichst auf Null stehen. Dann wird die synchronisierende Kraft der Maschinen am wenigsten in Anspruch genommen, weil dieselben dabei so arbeiten, wie wenn sie einzeln wären, und jede Maschine so viel Strom leistet, als der Kraftzufuhr bei der gegebenen Geschwindigkeit und Erregung entspricht.

Ist das äufsere Leitungsnetz nicht induktionsfrei, indem z. B. Umformer zu speisen sind, dann tritt eine allgemeine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ein und werden daher in der Maschinenanlage alle Phasenzeiger abgelenkt. Dies stört keineswegs die beschriebene Art der Beobachtung, welche Maschine zu viel oder zu wenig erregt ist, da man nur die Gröfse der Ablenkungen der einzelnen Phasenzeiger zu vergleichen braucht. Der ungezwungenste, die synchronisierende Kraft nicht beanspruchende Zustand ergiebt sich dann, wenn sämtliche Maschinen die gleiche Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung besitzen; diese Verschiebung ist gleich der im ganzen Netze

herrschenden und würde auch bestehen, wenn die Maschinen nicht parallel verbunden wären.

Anstatt nach Maafsgabe der Ablenkungen der Phasenzeiger die Erregungen der Maschinen mit der Hand nachzustellen, kann man diese auch selbstthätig durch die Phasenzeiger bewirken. So läfst sich z. B. der als Phasenzeiger dienende Drehstrom-Motor mit der die Erregung veranlassenden Kurbel des Widerstandskastens kuppeln. Diese Kurbel wird sich dann so lange nach rechts oder links drehen, bis die Phasenverschiebung unter eine bestimmte Grenze gekommen ist.

Das beschriebene Verfahren ist naturgemäfs für alle Wechselstrom-Maschinen ohne Unterschied der Anzahl ihrer Stromkreise anwendbar, also auch für sog. Mehrphasen-Maschinen.

II. Abteilung.

Das magnetische Drehfeld.

Die Arbeiten von Prof. Ferraris, von Bradley und von Tesla. — Die Kunstphase. — Die Arbeiten von Zipernowsky und Deri, von Wahlström, von Schallenberger, von Dobrowolsky, von Haselwander.

A. Drehfeld mit zweiphasigen Wechselstrom.

Die Vorzüge und Mängel des einfachen Wechselstromes wurden in Vorstehendem ausführlich geschildert und sind dieselben auch in der Folge als Einleitung zum Kapitel Drehstrom-Motoren des weiteren erörtert. Schon seit vielen Jahren ist es das eifrigste Bestreben der Wechselstrom-Techniker, brauchbare und bessere Wechselstrom-Motoren zu bauen. Eigentliche und zugleich völlig zufriedenstellende Resultate konnten aber trotz der Genialität der gelieferten Konstruktionen nicht verzeichnet werden, bis Prof. Galileo Ferraris in Turin sowie fast gleichzeitig Nikola Tesla in New York (circa 1888) die gelungene und vielversprechende Idee hatten, den ausgetretenen Weg des einfachen Wechselstromes zu verlassen und mittels Kombinationen Abhilfe gegen die bestehenden und bekannten Mängel zu schaffen.

Das Verdienst der ersten Veröffentlichung über den Drehstrom gebührt ohne Frage dem Prof. Galileo Ferraris, welcher seine grundlegenden Untersuchungen in den „Berichten der kgl. Akademie der Wissenschaften in Turin (Band 23 1887 bis 1888)“ [1] unterm 18. März 1888 veröffentlicht hat.

[1] Atti della R. Accademia delle Scienze di Torino. Vol. XXIII. 1887/1888.

Ferraris geht dabei von folgenden Betrachtungen aus: Magnetische Kräfte, die von zwei elektrischen Strömen erzeugt werden, wirken gemeinsam auf einen Punkt O (Fig. 45), und die Richtungen und Intensitäten der beiden Kräfte, welche senkrecht zu einander stehen sollen, werden durch die Längen OA und OB, die auf den Koordinaten eines rechtwinkeligen Systems abgetragen sind, dargestellt; dann ergiebt die Diagonale OR nach den bekannten Prinzipien der Mechanik ihrer Länge und Richtung nach die Intensität und Richtung des resultierenden magnetischen Feldes.

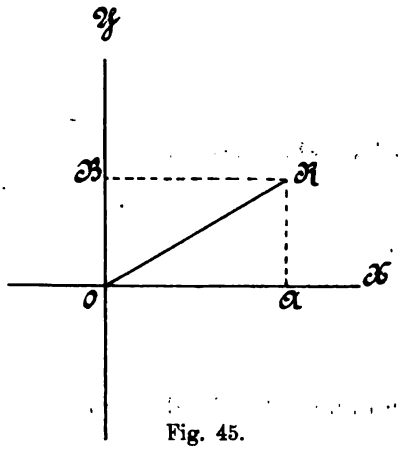


Fig. 45.

Wenn die Intensitäten der beiden komponierenden magnetischen Felder sich nun mit der Zeit ändern, so ändert auch der Punkt R seine Lage und durchläuft eine Kurve, deren Gestalt durch das Gesetz bestimmt ist, nach welchem sich die durch OA und OB dargestellten Kräfte ändern.

Sind die beiden Ströme sinusoidale Wechselströme mit gleicher Periode, dann ändern sich in gleicher Weise die Intensitäten der beiden komponierenden magnetischen Felder. Bezeichnen wir ihre wechselnden Werte mit x bezw. y, so lassen sich dieselben als Funktionen der Zeit (t) darstellen durch die Gleichungen

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1_a)$$

$$y = B \sin \frac{2\pi}{T} (t + \beta) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1_b)$$

Dabei bedeuten:

A und B die Maximalwerte der magnetischen Kräfte,

T die gemeinsame Periode der Wechselströme und

$\frac{\beta}{T}$ den Phasenunterschied derselben.

Eliminiert man t aus diesen beiden Gleichungen, um eine Beziehung zwischen x und y herzustellen, so erhält man eine Gleichung zwischen diesen, welche bekanntlich im allgemeinen

Falle der analytische Ausdruck einer Ellipse ist. Dies ist die Kurve, welche der Punkt R durchläuft, wie oben ausgeführt ist.

In dem Falle, dafs der Phasenunterschied zwischen den beiden Strömen Null oder ein Vielfaches von $^1/_2$ ist, wird die Ellipse zu einer Geraden, welche durch O geht.

Wir betrachten nunmehr den besonderen Fall, bei welchem die beiden senkrecht aufeinander stehenden, komponierenden magnetischen Felder gleich sind und den Phasenunterschied $^1/_4$ haben, bei welchem mithin

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2_a)$$

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} (t + {}^1/_4\, T)$$

$$= A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$y = A \cos \frac{2\pi}{T} t \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2_b)$$

Werden die Gleichungen 2_a und 2_b quadriert und zu einander addiert, so erhält man

$$x^2 + y^2 = A^2 \sin^2 \frac{2\pi}{T} t + A^2 \cos^2 \frac{2\pi}{T} t$$

$$= A^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

und das ist die Gleichung eines Kreises mit dem Radius A um das Centrum O, welchen der Punkt R durchläuft. Das resultierende Feld OR ist daher in diesem Falle ein konstantes, welches sich mit der gleichförmigen Winkelgeschwindigkeit $\frac{2\pi}{T}$ um den Punkt O dreht.

Der Vorgang während einer Periode wird durch die Fig. 46 veranschaulicht. In derselben werden die beiden komponierenden Kräfte durch die zwei Spulengruppen I I, II II gebildet, welche von Wechselströmen von gleicher Periode und $^1/_4$ (oder 90°) Phasenunterschied gespeist werden. (Siehe Diagramm Fig. 51, Seite 87.) Die Spulenpaare sind auf einem Eisenringe senkrecht zu einander angebracht.

Beim positiven Maximum des Stromes I sind die Spulen II stromlos und der Strom I erzeugt oben einen Nordpol, geometrisch gegenüber einen Südpol; die Richtung des erzeugten magnetischen Feldes ist durch einen Pfeil angedeutet. In dem Maafse, wie in

I der Strom sinkt, steigt er in II, und dieser erreicht gleichzeitig mit dem Stromloswerden von I sein positives Maximum

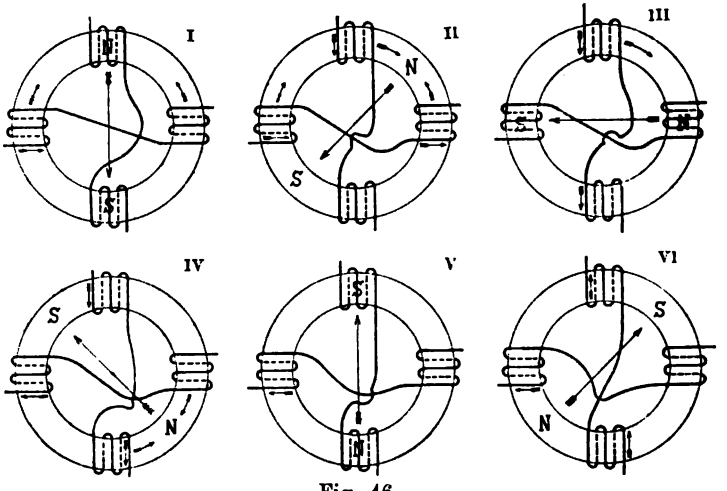


Fig. 46.

und erzeugt im Eisenringe rechts einen Nordpol, gegenüber den zugehörigen Südpol u. s. f.

Das resultierende magnetische Feld dreht sich mithin während $^1/_4$ Periode um 90 Grad. Die jeweiligen Zwischenlagen in den

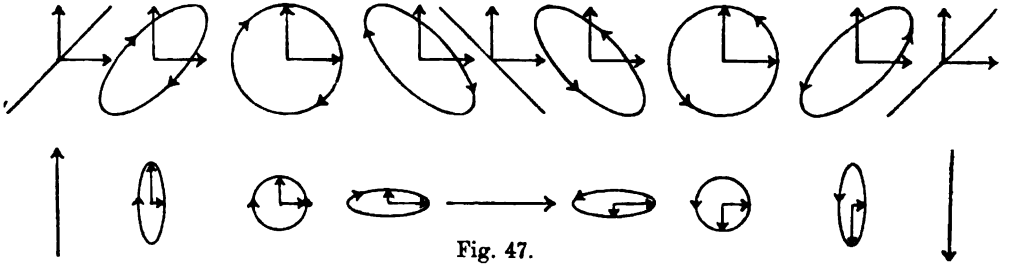


Fig. 47.

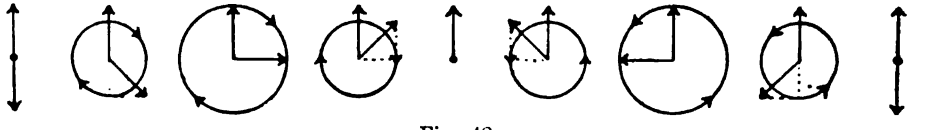


Fig. 48.

so durchlaufenen Quadranten entsprechen den zu Fig. 45 gegebenen Erörterungen.

Man hat vielfache Versuche angestellt, die Schaffung eines

richtigen Bildes von der Bildung magnetischer Drehfelder zu erleichtern. So ging z. B. A. du Bois-Reymond bei einem Vortrage über diesen Gegenstand von der Entstehung des elliptisch und kreisförmig polarisierenden Lichtes aus und veranschaulichte seine Auffassung vom Drehfelde in den beiden aufserordentlich instruktiven Fig. 47 und 48.

Ein Atheratom führt gleichzeitig zwei einfache, sinusartige Schwingungen gleicher Periode und Amplitude aus, welche senkrecht zu einander gerichtet sind. Man erhält für jeden Zeitpunkt den Radius vector der resultierenden Schwingungsfigur als Diagonale eines Parallelogramms, dessen Komponenten die beiden Entfernungen vom Mittelpunkte sind, welche das Atom in dem betreffenden Zeitpunkte erreichen würde, wenn es nur die eine oder die andere Sinusschwingung ausführte.

So entstehen die Figuren der ersten Gruppe in Fig. 47, wenn zwischen dem zeitlichen Verlaufe der beiden Schwingungen eine Phasenverschiebung von $^0/_8$ $^1/_8$ $^2/_8$ $^3/_8$ .... $^8/_8$ der Periode stattfindet.

Im ersten Falle ist die Phasenverschiebung gleich Null. Verdreht man die Richtung der zweiten Komponierenden, bis sie mit der Richtung der ersten Komponierenden einen Winkel von 180° einschliefst, so schrumpft die resultierende Schwingungsfigur in einen Punkt zusammen.

Bilden im zweiten Falle die beiden Komponierenden einen Winkel von 135°, so erhalten wir den Kreis, d. i. Fall 2 in Fig. 48. Kurz, die Gruppe 1 der Fig. 47 geht über in die Fig. 48, wenn wir den Winkel, welchen die beiden Komponierenden miteinander einschliefsen, stets gleich dem Supplement der Phasenverschiebung machen. Die Durchmesser der erhaltenen Kreise oder die Intensitäten der Drehfelder sind aber nicht mehr gleich der Amplitude, wie es bei den Kreisen der Fig. 48 der Fall ist, sondern nur noch gleich dem Produkte aus der Amplitude und dem Sinus des von den Richtungen der beiden Komponenten eingeschlossenen Winkels.

Fig. 49 stellt schematisch die Anordnung eines Versuches dar, welchen Ferraris, wie er angiebt, bereits im Herbste 1885 ausgeführt hat.

1AAA1' und *2BBB2'* sind flache Spiralen, welche senk-

recht zu einander stehen, und O' ist ein an einem Faden O aufgehängter Kupferzylinder. Fliefst ein Wechselstrom nur in einer der beiden Spulen, so bleibt der Zylinder unbewegt. Sendet man jedoch durch beide Spulen Wechselströme, die in der Phase zu einander verschoben sind, wie es z. B. das Diagramm Fig. 51 zeigt, dann setzt sich der Zylinder sofort in Bewegung und rotiert um seine Achse.

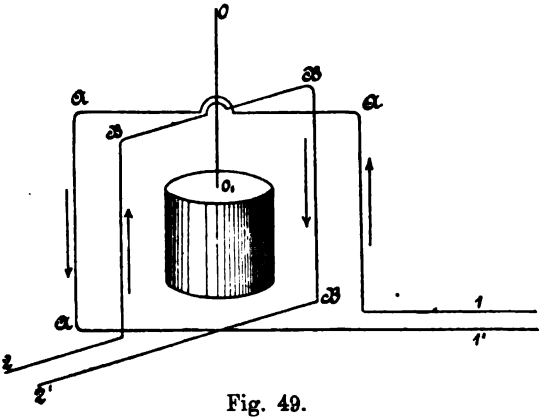


Fig. 49.

Vertauscht man die beiden Enden einer Spule mittels eines Kommutators miteinander, so wird die Phase des dieselbe durchfliefsenden Wechselstromes um $^1/_2$ Periode geändert und dadurch die Rotationsrichtung des Zylinders umgekehrt.

Der Versuch gelingt auch, wenn man statt des Kupfers einen Zylinder aus massivem Eisen oder auch unterteiltem Eisen verwendet, doch soll in letzterem Falle der Zylinder mit Kupferdrähten umwickelt oder mit einem Kupfermantel umgeben sein. Die in den Multiplikationen zirkulierenden Wechselströme üben auf den Zylinder ein Drehmoment aus, so dafs der letztere rotieren mufs, so lange die Wechselströme in den Spulen kreisen.

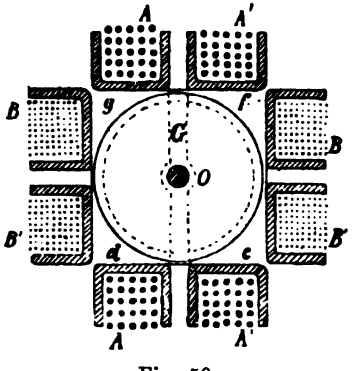


Fig. 50.

Im Anschlusse an diese Versuche hat Ferraris einen Drehstrom-Motor gebaut, von welchem Fig. 50 die Anordnung der hauptsächlichsten Teile zeigt. Der bewegliche Teil desselben (der Anker) bestand aus einem hohlen Kupferzylinder G, welcher oben und unten mittels Kupferplatten verschlossen und auf einer Welle O befestigt war. Der äufsere

Durchmesser desselben betrug 8,9 cm, die Länge 18 cm, das Gewicht 4,9 kg. Die horizontale Achse hatte einen Durchmesser von 1 cm und lief in zwei Lagern.

Der feste Teil bestand aus zwei Gruppen von Spulen, welche in der Figur im Schnitt erscheinen. Die eine Spulengruppe (AA, $A'A'$) war aus 1,2 mm Kupferdraht hergestellt und jede Spule enthielt 96 Windungen; die beiden Spulen waren hintereinander geschaltet; der Widerstand wurde mit 0,448 Ohm gemessen. Die andere Spulengruppe (BB, $B'B'$) enthielt per Spule 504 Windungen eines 0,97 mm Kupferdrahtes; diese Spulen waren parallel gewickelt und hatten 7,12 bezw. 6,63, zusammen 3,43 Ohm.

Warum Ferraris hier in den Spulengruppen verschieden starke Drähte verwendet, soll später bei der Besprechung der Kunstphase begründet werden.

Bei wirkenden Wechselströmen rotierte der bewegliche Teil genau so wie der Kupferzylinder beim vorher beschriebenen Experimente.

Darin aber hat sich Ferraris doch geirrt, als er behauptete, der Nutzeffekt bei solchen Motoren könne nie mehr als 50% betragen und deswegen sei eine solche maschinelle Anlage industriell wertlos. Er kalkulierte:

Nehmen wir an, dafs ein magnetisches Feld von zwei sinusoidalen Wechselströmen mit einer Phasendifferenz von 30° erzeugt sei. Demnach hat das Feld unveränderliche Intensität und dreht sich um die Achse mit gleichförmiger Geschwindigkeit.

Bezeichnet Ω die Winkelgeschwindigkeit des Feldes,

ω „ „ „ Zylinders,

also: $\Omega - \omega$ die relative Geschwindigkeit;

ferner: M das auf den Zylinder ausgeübte Drehmoment,

P die Energie, welche sich in der Zeiteinheit im Zylinder durch die elektrischen Strömungen in Wärme umsetzt,

dann ist die mechanische Arbeit

$$W = M\omega \text{ und}$$
$$P = M(\Omega - \omega).$$

Da die Wärmemenge gleich sein mufs der Energiemenge, durch welche sie erregt wird, so ist der Wert für P richtig angesetzt. Die Wärmemenge ist aber auch gleich der Arbeit, welche zur Erhaltung der Relativbewegung beider Geschwindigkeiten zwischen Feld und Zylinder notwendig ist.

Aus jenen beiden Gleichungen ergiebt sich für das Verhältnis der mechanischen Arbeit zur Summe des Energieaufwandes $(W+P)$, d. i. also für den Nutzeffekt:

$$\frac{W}{W+P} = \frac{\omega}{\Omega}.$$

Das alles gilt immer nur unter der Voraussetzung, dafs die Intensität des magnetischen Feldes nicht schwankt und dafs dieses mit gleichförmiger Geschwindigkeit um die Achse rotiert; unter dieser Annahme entstehen im Zylinder auch Induktionsströme, welche, in verschiedenen Momenten betrachtet stets die gleiche Konfiguration haben. Die von diesen Induktionsströmen erzeugte Wärme ist ebenso grofs als jene, die sich entwickeln würde, wenn die Ströme konstant wären und ihre Stellung im Felde nicht verändern würden. Bedeutet c den spezifischen Widerstand des Metalles, dann ist der Strom in einem Elemente proportional $(\Omega - \omega) : c$, und die Wärmemenge

$$c\left(\frac{\Omega-\omega}{c}\right)^2 = \frac{(\Omega-\omega)^2}{c}.$$

Ist k eine Konstante, dann wird

$$P = \frac{k}{c}(\Omega-\omega)^2,$$

Setzt man diesen Wert in obige Formeln ein, so erhält man

$$W = \frac{k}{c}(\Omega-\omega)\,\omega \text{ und}$$

$$M = \frac{k}{c}(\Omega-\omega).$$

Nun hat aber Ω — so schliefst Ferraris — einen bestimmten durch die Periode des Wechselstromes gegebenen Wert; deshalb ersehen wir, dafs man den maximalen Wert der mechanischen Arbeit $(W = M\omega)$ erhält, wenn

$$\omega = \frac{\Omega}{2},$$

wenn also $W = P$ ist, oder wenn die mechanische Arbeit denselben Wert hat, wie die im Zylinder verzehrte Wärmemenge.

Ferraris verwechselte hier Wirkungsgrund mit maximaler Stromstärke und mufste daher zu solch irrigem Resultat gelangen.

Betrachten wir das Diagramm der mehrfach erwähnten, in der Phase um 90° verschobenen Wechselströme (Fig. 51), so finden wir, dafs die Summe der Energie beider Ströme nicht konstant ist, und in dem Momente, wo beide Ströme einander gleich werden, um 40% des Mindestwertes mehr beträgt als zur Zeit, wo der eine Strom ein Maximum, der andere gleich Null ist. Die totale Anzahl der Ampèrewindungen, welche das Feld in einem Zweiphasen-Drehstrome erregen, schwankt also um 40 % ihres geringsten Wertes, das Feld wird infolgedessen nicht nur rotieren,

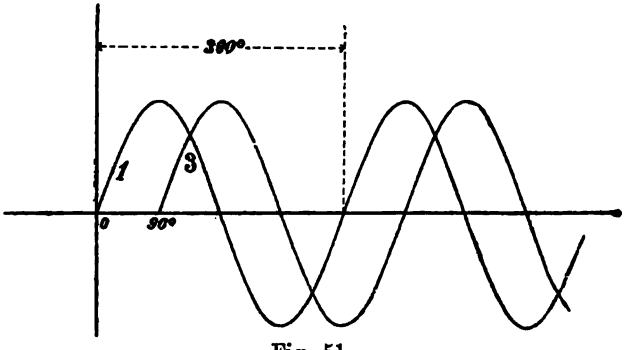


Fig. 51.

sondern auch pulsieren, d. h. es wächst in gleichmäfsigen Zwischenräumen an und fällt regelmäfsig um denselben Betrag wieder ab.

v. Dobrowolsky war der erste, welcher darauf verwies, dafs diese Pulsationen bremsend wirken, und daher die Funktion eines solchen Motors nicht fördern.

Erregt man die Elektromagneten einer gewöhnlichen Dynamo-Maschine separat aus einer anderen Elektrizitätsquelle, und schliefst man dann die Bürsten an der Armatur kurz, so wird sich diese nur mit grofser Anstrengung mechanisch rotieren lassen, wenn auch deren Leerlauf sonst bei nicht erregten Elektromagneten minimale Kraft erfordert. Offenbar übt der erregte Elektromagnet auf den kurzgeschlossenen Anker ein Drehmoment aus, das sich jeder mit der Hand zu bewirkenden Drehung entgegenstemmt.

Beim beschriebenen Ferraris-Motor und bei allen Maschinen, die nach demselben Prinzip mit in der Phase verschobenen Wechselströmen betrieben werden, wird das vorerwähnte Drehmoment ausgenutzt; denn ein kurzgeschlossener Anker wird im

Drehfeld der Bewegung des Feldes folgen, und bei Kraftüberschufs auch noch eine Zugkraft ausüben.

Letztere entspricht dabei der Differenz zwischen dem Antriebe des rotierenden Feldes und der Bremsung seitens des pulsierenden Magnetismus. Das Bestreben synchron zu bleiben, hat ein solcher Motor in hohem Grade, so dafs bei Überlastung seine Zugkraft rasch abnimmt.

Die bekannten Erscheinungen, welche in den Gesetzen des Elektromagnetismus Ausdruck gefunden haben, beeinträchtigen das der Konstruktion zweiphasiger Drehstrom-Motoren zu Grunde liegende Prinzip: dafs die resultierende Kraft der zwei senkrecht zu einander stehenden Spulen auf einen idealen Magnetpol konstant sei.

v. Dobrowolsky hat für diese Art der Ausnützung elektrischer Energie die Bezeichnung „Drehstrom" vorgeschlagen. Eine Unterscheidung der verschiedenen Stromarten war dringend geboten, denn wir werden sehen, dafs sowohl die direkten als auch die Fernwirkungen der in der Phase verschobenen Wechselströme wesentliche und charakteristische Merkmale zeigen. Während der einfache Wechselstrom eine freibewegliche Magnetnadel in Schwingungen versetzt, welche dem Pendelgesetze folgen, und der Gleichstrom das Bestreben, hat eine solche Magnetnadel dauernd in eine senkrechte Stellung zu seiner von Süd nach Nord gehenden Richtung zu stellen, veranlafst der Drehstrom eine freiaufgehängte Magnetnadel sich um ihren Aufhängepunkt zu drehen, und wenn der in der Fig. 46 eingezeichnete Pfeil diese Magnetnadel bedeutet, so ist aus jener Darstellung klar ersichtlich, dafs die Nadel in jenem vom Eisenringe eingeschlossenen Raume bei wirkenden Strömen thatsächlich Drehungen um volle 360 Grad ausführen mufs. Auch ein freibeweglicher Eisenstab, welcher statt der Nadel derart aufgehängt würde, müfste bei ausreichender Intensität der Drehmomente in Rotationen versetzt werden, genau so wie der mehrerwähnte Kupfer- oder Eisenzylinder.

Bezüglich der historischen Entwickelung der Erzeugung und Ausnützung verschiedenphasiger Wechselströme sind folgende Daten interessant:

Schon Ende der 70er Jahre hat Gramme Ströme ver-

schiedener Phase in demselben Generator erzeugt, fortgeleitet und gesondert ausgenutzt. Solche Anlagen finden wir auch in technischen Zeitschriften beschrieben.

Ferner verweisen wir auf die dritte Auflage des Buches „Die magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschinen" von Schellen. Dasselbe ist 1884 in Köln erschienen und finden wir Seite 309 wörtlich folgende Stelle:

„Die 32 äufseren Drahtrollen *a b c d* u. s. w. sind voneinander isoliert, und jede giebt ihre Enden an zwei isolierte Klemmen *e e* (Fig. 176) ab, so dafs es möglich ist, ganz nach Belieben 32 einzelne, von einander unabhängige Ströme aus der Maschine abzuleiten, oder durch geeignete Verbindung der Klemmen 16, 8 oder gar nur 4 einzelne Ströme (von gröfserer Stärke) zu erhalten, wie diese gegenwärtig bei der Beleuchtung des Hippodroms, des Opernplatzes u. s. w. zu Paris geschieht."

In der vierten Auflage des Buches „Dynamo-Electric-Maschinery" von Silvanus P. Tompson wird ebenfalls aus-

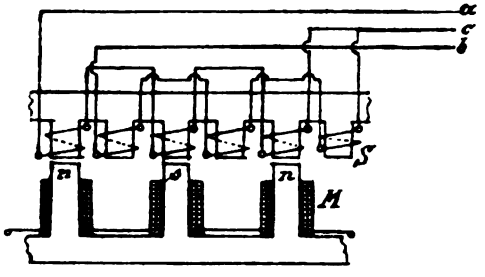


Fig. 52.

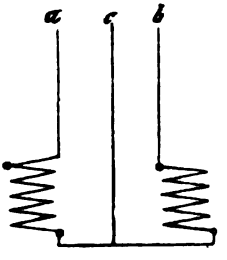


Fig. 53.

geführt, dafs man mit der Grammeschen Maschine vier phasenverschobene Wechselströme erzeugen könne.

Auch Zipernowsky & Deri haben laut eines Patentes vom 26. August 1888 die Verwendung von Wechselströmen, welche in der Phase zu einander verschoben sind, angebahnt, und sie haben die Erzeugung von zwei oder mehreren Wechselströmen mit gegeneinander verschobenen Phasen auf folgende Weise bewirkt:

Die Fig. 52 zeigt schematisch eine solche Vorrichtung, und Fig. 53 die zugehörige Spulenschaltung. Hier werden Ströme erzeugt, die um $^1/_4$ Periode gegeneinander verschoben sind und

daher dem Diagramme Fig. 51 entsprechen. Zur Leitung sind aber zwei Drähte und eine gemeinsame Rückleitung in Verwendung. Die Anzahl der Ankerspulen ist doppelt so grofs, wie die der Feldmagnete, und gehören die Spulen abwechselnd zu einem Stromsystem. Man kann sich auch zwei Maschinen hintereinander geschaltet und mit einer Mittelleitung versehen denken, oder auch so, dafs sie in einer Leitung parallel geschaltet sind, während sie in der anderen gesondert bleiben, je nachdem im Augenblick die Richtung der beiden Ströme gleich oder entgegengesetzt ist.

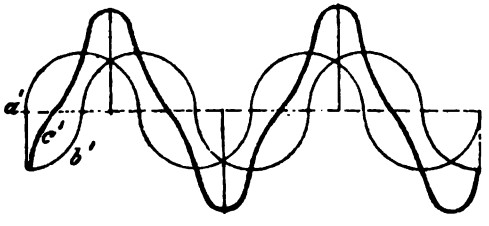


Fig. 54.

Der Strom, welcher in der mittleren Leitung fliefst, setzt sich aus den zwei Strömen der zwei Spulensysteme in der Weise zusammen, wie es die Fig. 54 zeigt, in welcher a' b' die Stromwellen in den Leitungen a und b, und c' die Stromwelle in der Leitung c darstellt.

Die Fig. 55 zeigt zwei solche Stromerzeuger in Verbindung und sind deren gleichphasige Spulensysteme parallel geschaltet.

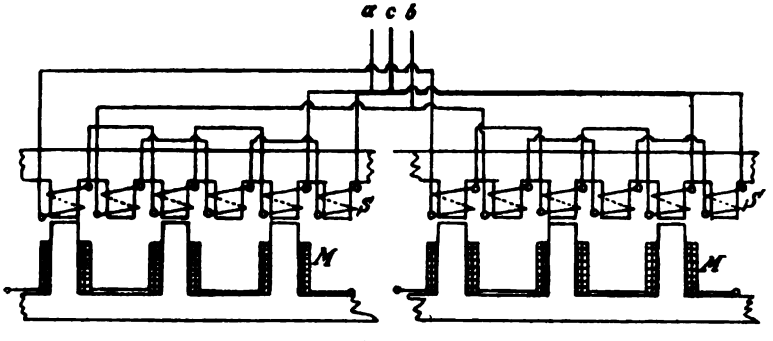


Fig. 55.

Hat man dreimal so viel Ankerspulen, wie Feldmagnete, so bekommt man drei Spulensysteme mit drei gegeneinander um $^1/_6$ Periode verschobenen Strömen.

Die Anzahl der Leitungen beträgt in diesem Falle entweder $3 \times 2 = 6$ oder $3 + 1 = 4$. Ist die Anzahl der Ankerspulen n-mal so grofs, wie die der Feldmagnete, so hat man n Ströme,

die gegeneinander um $\frac{1}{2}n$ Periode verschoben sind. Die geringste Zahl der in diesem Falle nötigen Leitungen ist $n+1$.

Derartige Stromerzeuger mit n Spulensystemen können natürlich wieder in beliebiger Anzahl mit ihren entsprechenden Spulensystemen parallel geschaltet sein.

Eine andere Art, um zwei oder mehrere in ihrer Phase gegeneinander verschobene Ströme zu bekommen, ist folgende: Man verwendet z. B. zwei Stromerzeuger, von denen jeder ebensoviel Ankerspulen hat, wie Elektromagnete, und die miteinander in einer solchen Weise starr oder zwangläufig gekuppelt sind, daſs, wenn die Elektromagnete des einen den Ankerspulen gerade gegenüberstehen, die Elektromagnete des anderen sich in der Mitte zwischen je zwei Ankerspulen befinden, wie es in Fig. 56 dargestellt ist. Hier hat jeder Stromerzeuger nur ein Spulensystem, welches mit dem des anderen so verbunden ist, wie die zwei Spulensysteme eines Stromerzeugers in Fig. 52.

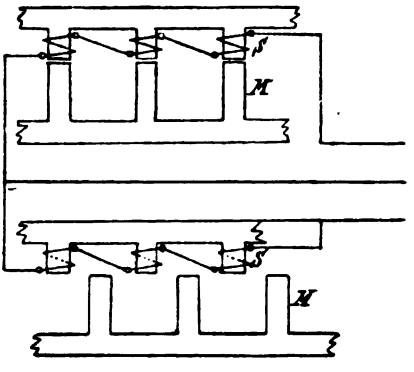


Fig. 56.

Um n-Ströme zu erhalten, von denen jeder gegen den vorhergehenden um $\frac{1}{2}n$ verschoben ist, muſs man auch n-Stromerzeuger haben, die miteinander starr und zwangläufig gekuppelt sind, so daſs die Elektromagnete eines jeden Stromerzeugers gegen die des vorhergehenden um $\frac{1}{n}$ des Winkels zwischen zwei Nachbarelektromagneten verdreht sind. Die erforderliche Anzahl der Leitungen wechselt zwischen $2n$ und $n+1$ und es können wieder mehrere Maschinengruppen parallel geschaltet werden.

Wenn wir uns nur an die offiziellen Quellen halten, und das sind in diesem Falle die Patentschriften, so finden wir in weiterer historischer Reihenfolge ein Deutsches Reichs-Patent Nr. 47 885 vom 1. Mai 1888 und ein denselben Gegenstand behandelndes Amerikanisches Patent Nr. 390414 vom 2. Oktober 1888, in welchen dem Nikola Tesla in New York (V. St. A.) die Erzeugung von zwei in der Phase um 90° verschobenen Wechsel-

strömen gesetzlich geschützt wird. Dieses Patent bezieht sich auf die Heranziehung von Gleichstrom-Dynamos nicht nur der Type Gramme, sondern auch der Typen Brush und Thomson-

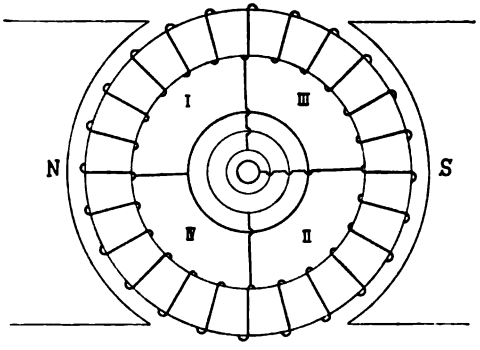


Fig. 57.

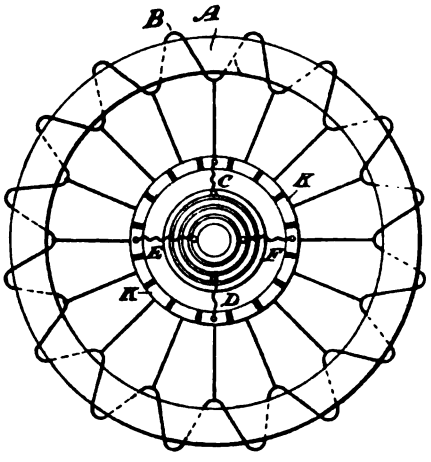


Fig. 58.

Houston. Wir werden diese Erfindung des Tesla dann sofort eingehender betrachten.

Merkwürdigerweise finden wir unterm gleichen Datum (2. Oktober 1888) ein amerikanisches Patent Nr. 390439, in welchem

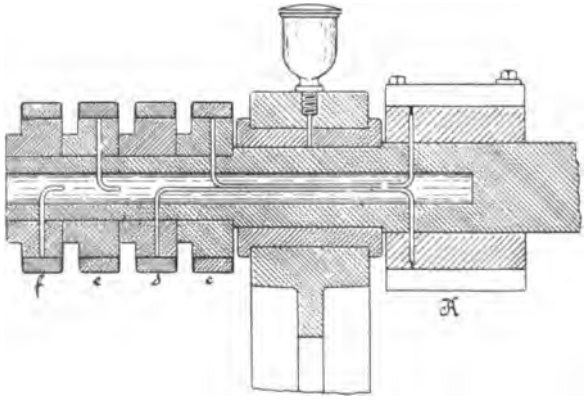


Fig. 59.

Charles S. Bradley, of Yonkers, New York klar entwickelt, auf welche Weise man aus einer der gebräuchlichen Gleichstrom-Dynamomaschinen mittels sehr einfacher Vorrichtungen zwei

Wechselströme, die in der Phase um $^1/_4$ Periode verschoben sind, abnehmen und ausnützen kann.

Die Bradleysche Idee wurde von der Firma Schuckert aufgenommen, praktisch durchgebildet und bei der elektrotechnischen Ausstellung 1891 in Frankfurt bei der Kraftübertragung vom Palmengarten zur Maschinenhalle öffentlich gezeigt.

Wenn man in einer Gleichstrom-Ring-Dynamo zwei diagonal gelegene Punkte der Multiplikation des Ankers zu isoliert auf der Armaturwelle sitzenden Kontaktringen führt und die Armatur im magnetischen Felde dreht, so erhalten wir, wie eine kurze Überlegung und das Schema Fig. 26 Seite 41 zeigt, einfache sinusoidale Wechselströme, die von den Schleifringen abgenommen und der äufseren Leitung zugeführt werden können.

Bradley kalkulierte nun: Wenn man statt zweier Punkte deren vier, die zu einander rechtwinkelig gelegen sind, mit Schleifringen so verbindet, wie es das nebenstehende Schema Fig. 57 und das ausführlichere Schema Fig. 58 zeigt, dann erhält man offenbar zwei Wechselströme, die in der Phase um 90° verschoben sind, so dafs ihre Kurven dem Diagramme Fig. 51 entsprechen.

Man kann also jede beliebige Gleichstrom-Dynamo zur Erregung von in der Phase um 90° verschobenen Wechselströmen verwenden, wenn man die Kollektorwelle verlängert, Fig. 59, vier Schleifringe aufsetzt und diese mit vier rechtwinkelig zu einander stehenden Kollektorsegmenten so verbindet, wie es die Fig. 58 zeigt und wie eine ausführlichere Konstruktionszeichnung auf Seite 42 für zwei Schleifringe ersichtlich macht.

Während sich Ferraris über die direkte Erzeugungsweise der zu seinem Experimente nötigen Wechselströme nicht weiter ausspricht (er verwendet die sogenannte Kunstphase), geben Bradley und Tesla in ihren Ausführungen eine einfache Konstruktion an, durch welche die Ausnutzung in der Phase verschobener Wechselströme wesentlich gefördert worden ist; und wenn auch nicht bekannt wurde, ob man in Amerika diese Konstruktionen ausgenutzt hat, so zeigte wenigstens Schuckert, dafs man damit Ersprieſsliches leisten könne.

Die Fig. 60a und 60b zeigen uns die Darstellungen, welche dem Gedankengange Bradleys bezüglich des zweiphasigen Drehstromes (die bezügliche Patentschrift datiert vom 9. Mai 1887

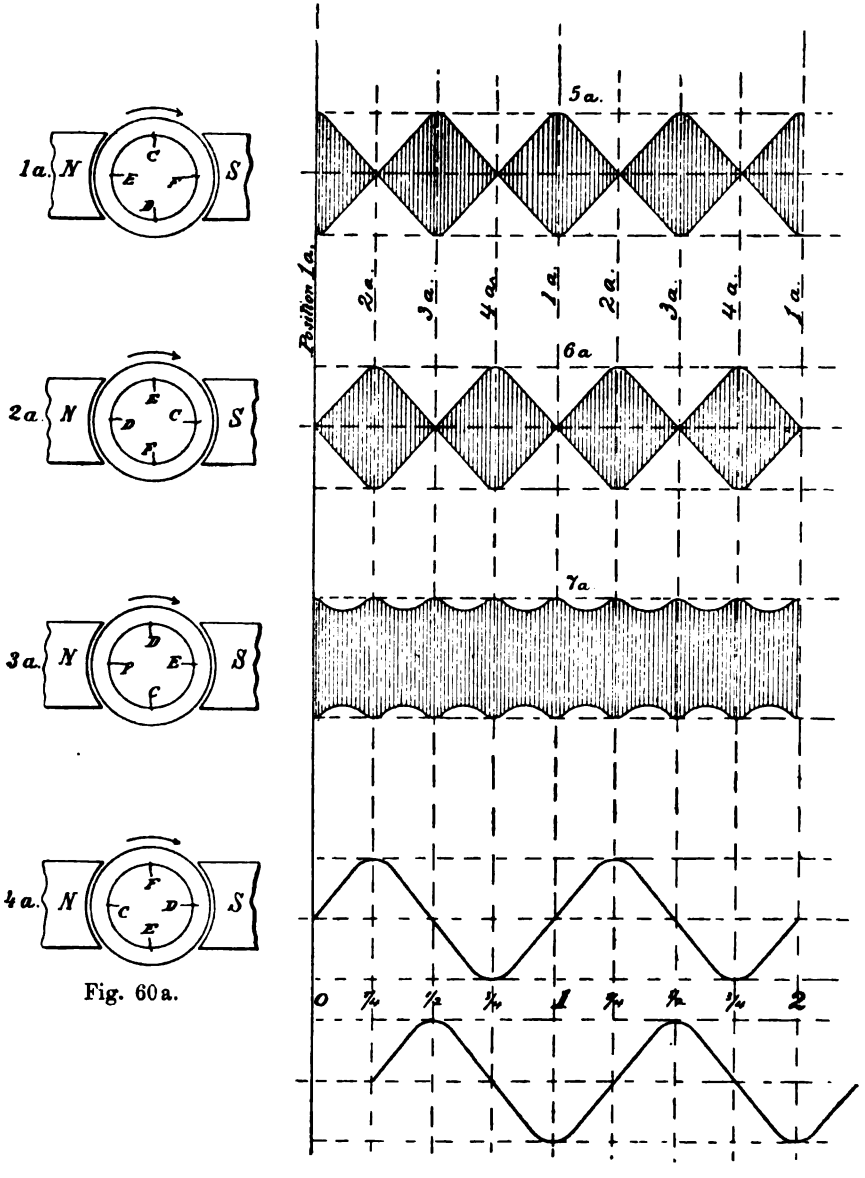


Fig. 60a.

Fig. 60b.

als Einreichungstermin) entsprechen; während die Figuren 61 und 62 jene Konstruktionsprinzipien zeigen, welche Tesla im Jahre 1888 am 23. April veröffentlichte.

Nikola Tesla erläutert seine Erfindung ungefähr auf folgende Weise: Ein Motor mit zwei oder mehr unabhängigen, erregenden Stromkreisen, durch welche in unten beschriebener Weise alternierende Ströme geschickt werden, welche eine fortschreitende Verschiebung des Magnetismus oder der Kraftlinien bewirken, funktioniert nach wohlbekannten Theorien [1]).

Es ist klar, dafs eine geeignete, fortschreitende Verschiebung oder Bewegung der Kraftlinien nutzbar gemacht werden kann,

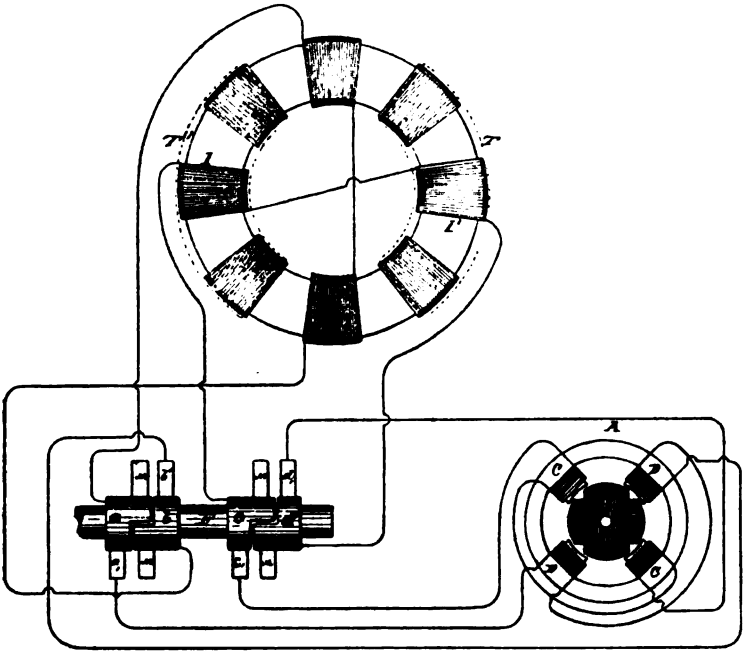


Fig. 61.

um eine Bewegung oder Drehung jedes Elementes des Motors, der Armatur und des magnetischen Feldes, herbeizuführen, und dafs kein Kommutator für den Motor erforderlich ist, wenn die durch die verschiedenen Stromkreise des Motors geleiteten Ströme die geeignete Richtung haben. Um also in dem System die sämtlichen gebräuchlichen Commutatoreinrichtungen zu vermeiden, sind die Stromkreise des Motors direkt mit denen einer geeigneten Erzeugungsquelle für Wechselströme verbunden.

[1]) Dieselben wurden beim Ferraris-Experiment erläutert.

Fig. 63, *1* bis *8*, sind Entwürfe, welche den Grundgedanken der Wirkungsweise von Tesla's Einrichtung zur Anschauung bringen.

Die Figuren 64 bis 71 sind Ansichten der Apparate in verschiedenen Ausführungsformen.

Fig. 64 ist ein Entwurf, welcher einen Motor, einen Erzeuger und die verbindenden Stromkreise nach der Erfindung

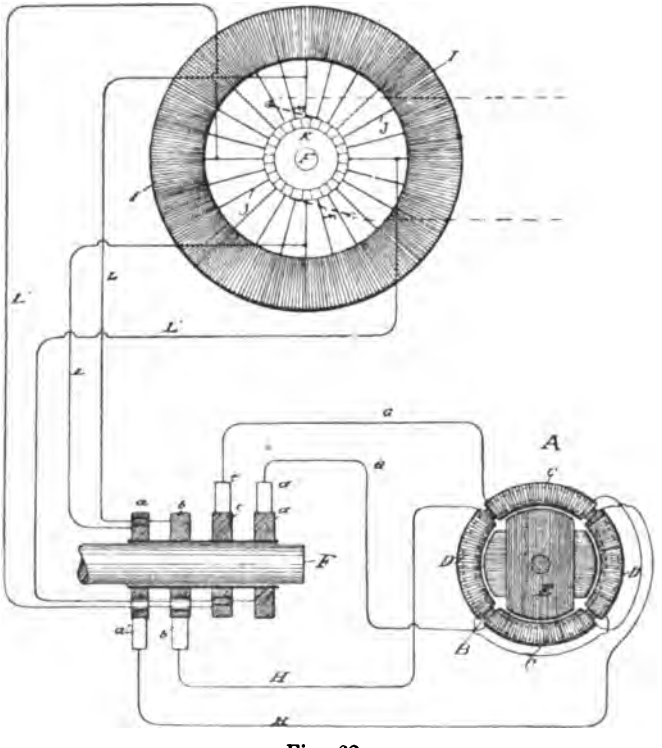


Fig. 62.

des Tesla darstellt. *M* ist der Motor und *G* der denselben antreibende Erzeuger.

Der Motor umfafst einen Ring *R*, der am besten aus dünnen isolierten Eisenringen oder Ringplatten zusammengesetzt wird, damit er so empfänglich wie möglich für in Bezug auf seinen magnetischen Zustand eintretende Änderungen ist; derselbe wird von vier Spulen *C C C' C'* umgeben, die aus isolierten Draht bestehen und symmetrisch angeordnet sind. Die einander dia-

metral gegenüberliegenden Spulen sind verbunden, so dafs sie paarweise bei Herstellung freier Pole an diametral gegenüberliegenden Teilen des Ringes zusammenwirken. Die so verbleibenden vier freien Enden sind mit den Klemmschrauben $T\,T\,T'\,T'$, wie angegeben, verbunden.

Dicht am Ringe, und am besten innerhalb desselben, ist auf einer Welle die gewöhnlich kreisrund geformte magnetische Scheibe D aufgekeilt, welche zwei ausgesparte Segmente hat und sich frei im Ringe R dreht.

Der Erzeuger G ist von der gewöhnlichen Art und hat in der Zeichnung magnetische Felder $N\,S$ und einen zylindrischen Ankerkern A, der mit den beiden Spulen $B\,B'$ umwickelt ist;

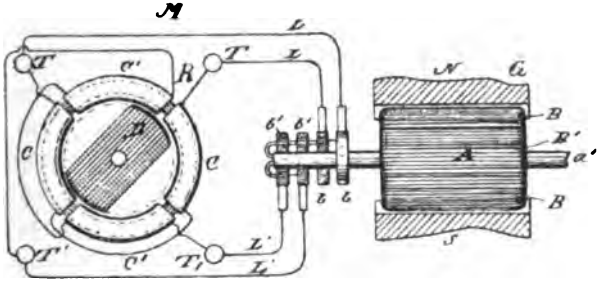


Fig. 64.

die freien Enden einer jeden dieser Spulen sind durch die Welle a' geführt und bezw. mit isolierten Kontaktringen $b\,b\,b'\,b'$ verbunden.

Gegen jeden Ring legt sich eine Schleiffeder und bildet eine Polklemme, durch welche der Strom nach und von dem Ringe geleitet wird; diese Polklemmen sind mit den Polklemmen $T\,T\,T'\,T'$ des Motors durch die Drähte $L\,L'$ in der gezeichneten Weise verbunden, wodurch zwei vollständige Stromkreise gebildet werden, von denen der eine beispielsweise die Spulen B des Erzeugers und $C'\,C$ des Motors, der andere dagegen die verbleibenden Spulen B' und $C\,C$ des Erzeugers und des Motors einschliefst.

Es erübrigt jetzt noch, die Wirkungsweise dieses Systemes zu erläutern, zu welchem Ende auf die Entwürfe der Fig. 1 bis 8 in der Gesamtfigur 63 behufs Veranschaulichung der verschiedenen Wandlungen, welche die Spulen des Erzeugers beim Betriebe durchzumachen haben, und der entsprechenden, daraus

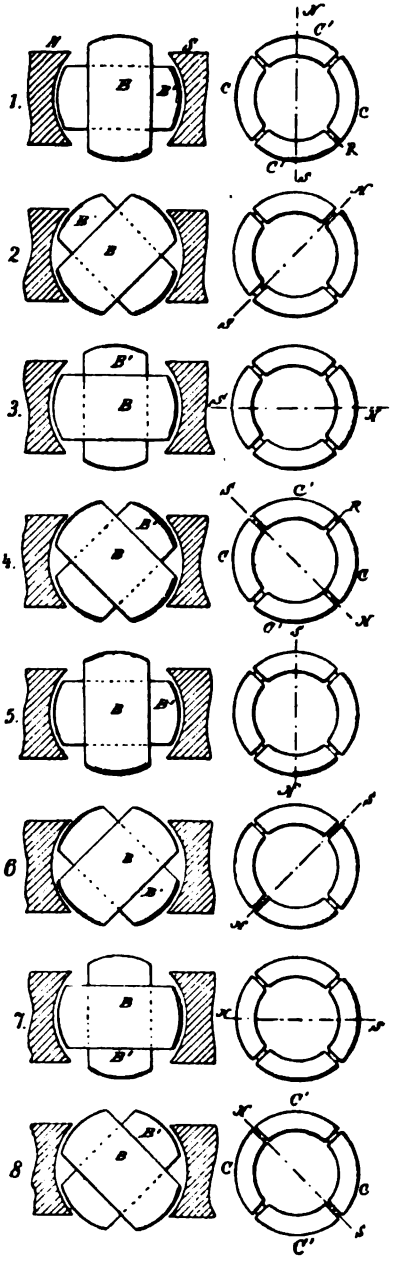


Fig. 63.

folgenden, im Motor erzeugten magnetischen Änderung verwiesen wird.

Wir wollen die rechtsstehenden Teile der Figuren *1* bis *8* in der Fig. 63 mit *1a*, *2a*, *3a* u. s. f. bezeichnen.

Die Umdrehung des Ankers des Erzeugers zwischen den Feldmagneten NS ruft, wie ersichtlich, in den Spulen BB' wechselnde Ströme hervor, deren Intensität und Richtung von den bekannten Gesetzen abhängig sind. Bei der in Fig. *1* angegebenen Stellung der Spulen ist der Strom in der Spule B praktisch gleich Null, während die Spule B' zu derselben Zeit ihren stärksten Strom entwickelt; durch die in Fig. 64 getroffenen Vorrichtungen kann der diese Spule einschliefsende Stromkreis auch beispielsweise die Spulen CC des Motors, Fig. *1a*, einschliefsen. Die Folge hiervon würde sein, dafs mit Hilfe der entsprechenden Verbindungen eine Magnetisierung des Ringes R stattfände, wobei die Pole sich auf der Linie N-S befänden.

Wird dieselbe Ordnung der Verbindungen zwischen der Spule B und den Spulen $C'C'$ beobachtet, so haben die letzteren, wenn sie von einem Strome durchflossen werden, das Bestreben, die Pole unter rechten Winkeln zur Linie N-S der Fig. *1a* zu erregen. Wenn nun die Erzeuger-

spulen eine Achtelumdrehung gemacht haben und in die in Fig. *2* gezeigte Lage treten, so ergiebt sich, dafs, beide Spulenpaare *C* und *C'* von Strömen durchflossen werden, die sich insofern entgegenwirken, wie die Lage der Pole in Betracht kommt. Diese Lage wird daher durch den erzielten Effekt der magnetisierenden Kräfte der Spulen bestimmt, d. h. dieselbe wird am Ringe entlang zu einer Stellung vorrücken, welche einer Achtelumdrehung des Ankers des Erzeugers entspricht.

In Fig. *3* ist der Anker des Erzeugers um eine Viertelumdrehung vorgeschoben. An der angegebenen Stelle ist der Strom in der Spule *B* am stärksten, während er in *B'* gleich Null wird, indem die letztere Spule sich in ihrer neutralen Lage befindet. Die Pole des Ringes *R* werden folglich in Fig. *3a* in eine Stellung verschoben, die um 90° von der zu Anfang gezeigten abweicht. Die bei jeder aufeinander folgenden Achtelumdrehung bestehenden Bedingungen sind in gleicher Weise in den übrigen Figuren veranschaulicht. Eine kurze Bezugnahme auf diese Figuren wird zum Verständnis ihrer Bedeutung genügen. Fig. *4* und *4a* versinnbildlichen die Lage, nachdem der Erzeugeranker eine Dreiachtelumdrehung gemacht hat. Hier erzeugen beide Spulen den Strom, aber es erregt die jetzt in das gegenüberliegende magnetische Feld eingetretene Spule *B'* einen Strom in der entgegengesetzten Richtung, der die entgegengesetzte magnetisierende Wirkung hat. Es werden daher die entstehenden Pole auf der Linie *N* - *S* liegen.

In Fig. *5* und *5a* ist eine halbe Umdrehung beendet mit entsprechender Bewegung der Pollinie des Motors. Bei diesem Stande befindet sich die Spule *B* in ihrer neutralen Stellung, während die Spule *B'* ihre höchste Stromleistung entwickelt, wobei der Strom dieselbe Richtung wie in Fig. *4* hat.

In Fig. *6* hat der Anker eine Fünfachtelumdrehung beendet. In dieser Lage entwickelt die Spule *B'* einen weniger kräftigen Strom, der aber dieselbe Richtung wie zuletzt hat. Andererseits erzeugt die in ein Feld von entgegengesetzter Polarität eingetretene Spule *B* einen Strom von entgegengesetzter Richtung. Die sich ergebenden Pole werden deshalb auf der Linie *N* - *S* der Fig. *6a* liegen, d. h. in anderen Worten: die Pole des Ringes sind um fünf Achtel seines Umfanges an letzterem entlang verschoben worden.

Fig. 7 und 7a veranschaulichen in derselben Weise die Wandelungen des Ringes und Erzeugers nach einer Dreiviertelumdrehung und Fig. 8 und 8a diejenigen nach sieben Achtelumdrehung des Erzeugerankers. Diese Figuren sind nach den vorhergehenden Erörterungen leicht verständlich.

Nach Beendigung einer vollständigen Umdrehung tritt der zu Anfang vorhanden gewesene Zustand wieder ein und dieselbe Wirkungsweise wiederholt sich während der nächsten und jeder weiter folgenden Umdrehung; es ergiebt sich also, dafs jede Umdrehung des Ankers im Erzeuger eine entsprechende Verschiebung der Pole oder Kraftlinien um den Ring herum hervorruft.

Dieser Effekt wird nutzbar gemacht, um die Umdrehung eines Körpers oder eines Ankers in verschiedenartiger Weise herbeizuführen. Wendet man beispielsweise das vorbeschriebene Prinzip auf den in Fig. 64 dargestellten Apparat an, so wird die Scheibe *D* infolge ihrer Neigung, die Stellung einzunehmen, in welcher sie die gröfstmögliche Anzahl magnetischer Linien umfafst, in Umdrehung versetzt, indem sie der Bewegung der Linien oder Punkte von der gröfsten Anziehung folgt.

Die in Fig. 64 dargestellte Scheibe *D* ist an ihren gegenüberliegenden Seiten weggeschnitten, was aber für ihre Wirkungsweise nicht wesentlich ist, da, wie auch punktiert angedeutet, eine kreisrunde Scheibe gleichfalls in Umdrehung erhalten werden würde. Diese Erscheinung ist wahrscheinlich einem gewissen Beharrungsvermögen oder Widerstand zuzuschreiben, der sich im Metall der raschen Verschiebung der Kraftlinien durch dasselbe gegenüber geltend macht, was einen beständigen tangentialen Zug auf die Scheibe zur Folge hat, welcher deren Umdrehung veranlafst. Dies scheint seine Bestätigung durch die Thatsache zu finden, dafs eine runde Stahlscheibe wirksamer als eine Scheibe aus weichem Eisen in Drehung versetzt wird, weil anzunehmen ist, dafs die erstere einen gröfseren Widerstand in Bezug auf die Verschiebung der magnetischen Linien besitzt.

Behufs Erläuterung anderer Ausführungsformen des Apparates wird jetzt auf die Figuren 65 bis 71 verwiesen.

Fig. 65 zeigt einen Motor teilweise in der Ansicht und teilweise im Schnitte. Fig. 66 zeigt denselben in der Kopfansicht mit dem magnetischen Felde im Schnitte und einem Entwurfe der Verbindungen. Fig. 67 ist eine End- oder Seitenansicht des

Erzeugers, ebenfalls mit dem magnetischen Felde im Schnitte. Diese Ausführungsform des Motors kann an Stelle der beschriebenen verwendet werden.

D ist ein zylindrischer oder trommelförmiger Ankerkern, der aus naheliegenden Gründen so weit wie thunlich aufgeschnitten sein soll, um die Zirkulation von Induktionsströmen innerhalb desselben zu verhindern. Der Kern ist der Länge nach mit zwei Spulen EE' umwickelt, deren Enden bezw. mit isolierten Kontaktringen $d\,d\,d'\,d'$ verbunden sind, welche auf der den Anker tragenden Welle *a* sitzen.

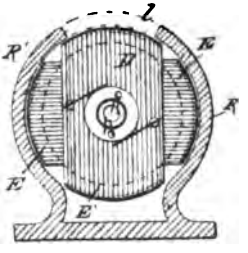


Fig. 65.

Der Anker ist in einem eisernen Gehäuse *R* drehbar angeordnet, welches das magnetische Feld oder ein anderes Element des Motors bildet. Dieses Gehäuse wird am besten mit einem Schlitze oder einer Oeffnung *l* versehen, kann aber auch, wie

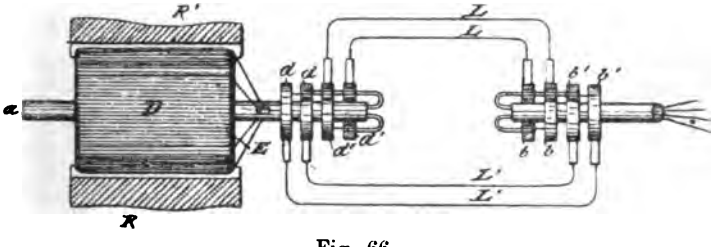


Fig. 66.

punktiert angedeutet, zusammenhängend sein, und wird in diesem Falle vorzugsweise aus Stahl hergestellt. Es erscheint ferner wünschenswert, dafs dieses Gehäuse in ähnlicher Weise wie der Anker und aus denselben Gründen aufgeschnitten sei.

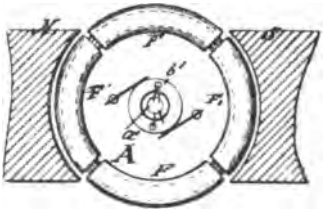


Fig. 67.

Der Erzeuger zum Betriebe dieses Motors kann der in Fig. 67 dargestellte sein. Derselbe besteht aus einem Ringanker *A*, umgeben von den vier Spulen $FFF'F'$, von denen die einander diametral gegenüberliegenden in Hintereinanderschaltung verbunden sind, so dafs vier freie Enden verbleiben, welche mit den

isolierten Kontaktringen $b\,b\,b'\,b'$ verbunden sind. Diese Ringe sind auf einer Welle a' zwischen den Polen $N\,S$ angeordnet.

Die Kontaktringe eines jeden Paares von Erzeugerspulen sind mit denen des Motors bezw. mittels Schleiffedern und der beiden Paare von Leitern $L\,L\,L'\,L'$ verbunden, wie in Fig. 66 im Entwurfe dargestellt ist.

Es erhellt aus einem Vergleiche der vorhergehenden Figuren, dafs die Umdrehung des Erzeugerringes in den Spulen $F\,F'$ Ströme erzeugt, welche nach ihrer Überleitung auf die Motor-

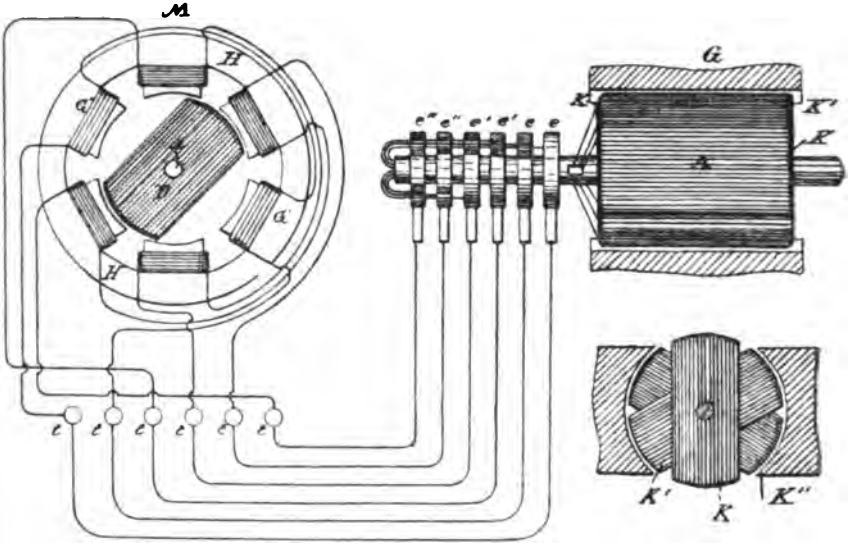


Fig. 68.

spulen dem Ankerkerne des Motors magnetische Pole geben, die beständig um den Kern herum verschoben werden. Dieser Effekt ruft eine Umdrehung des Motorankers infolge der Anziehungskraft zwischen dem Gehäuse R und den Polen des Ankers hervor; insofern aber die Spulen in diesem Falle sich in Bezug auf das Gehäuse oder das magnetische Feld bewegen, findet die Bewegung der Spulen in entgegengesetzter Richtung zu der fortschreitenden Bewegung der Pole statt.

Es sind auch andere Anordnungen der Spulen sowohl des Erzeugers als auch des Motors möglich, und es kann eine gröfsere Anzahl von Stromkreisen angewendet werden, wie aus den beiden nächstfolgenden Figuren ersichtlich wird. Fig. 68 zeigt im Ent-

wurfe einen Motor und Erzeuger, die in Gemäfsheit der Erfindung Teslas verbunden und angeordnet sind.

Das Feld des Motors *M* wird durch sechs magnetische Pole *G' G'* hergestellt, die an einem Ringe oder Rahmen *H* sitzen. Diese Magnete oder Pole sind mit isolierten Spulen umwickelt, von denen die einander diametral gegenüberliegenden paarweise miteinander verbunden sind, so dafs entgegengesetzte Pole in jedem Paare geschaffen werden.

Dies ergiebt sechs freie Enden, welche mit den Polklemmen *t* verbunden sind.

Der Anker, welcher zwischen den Polen drehbar angeordnet wird, ist ein auf der Welle *a* sitzender Zylinder oder eine Scheibe *D*

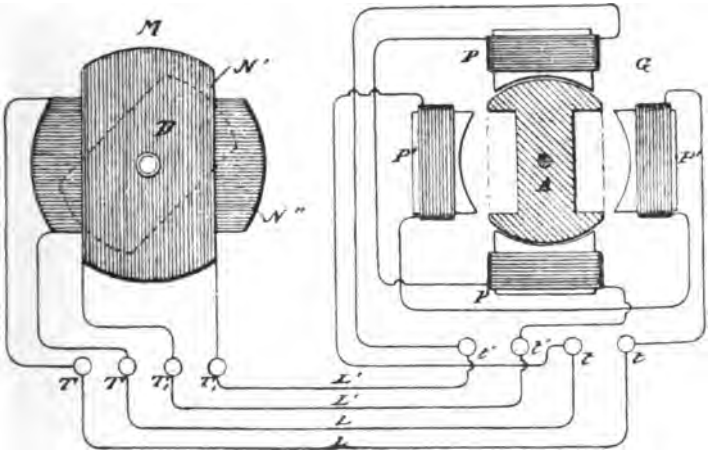


Fig. 69.

aus Schmiedeisen. Zwei Segmente dieser Scheibe sind weggeschnitten, wie gezeichnet.

Der Erzeuger für diesen Motor hat in diesem Falle einen mit drei Spulen *K K' K''* in Abständen von 60° umwickelten Anker *A*. Die Enden dieser Spulen sind bezw. mit isolierten Kontaktringen *e e' e' e'' e''* verbunden, welche mit denen des Motors in der gehörigen Reihenfolge mittels Sammelbürste oder Schleiffedern und durch sechs, unabhängige Stromkreise bildende Drähte verbunden sind. Die Änderungen in der Stärke und Richtung des durch diese Stromkreise geschickten und die Motorspulen durchlaufenden Stromes rufen eine stetig fortschreitende Verschiebung der erhaltenen Anziehungskräfte, mit denen die Pole *G'*

auf den Anker D einwirken, hervor und erhalten demgemäfs den Anker in rascher Drehung. Die Anwendung dieses Prinzipes auf Systeme, welche nebeneinander verbundene Stromkreise enthalten, werden aus dem beschriebenen Apparate leicht verständlich.

Die Fig. 69 zeigt eine Darstellung einer abgeänderten Anordnung der Erfindung im Entwurfe.

In diesem Falle ist eine (am besten an gegenüberliegenden Rändern, wie punktiert angedeutet) ausgesparte Scheibe D aus

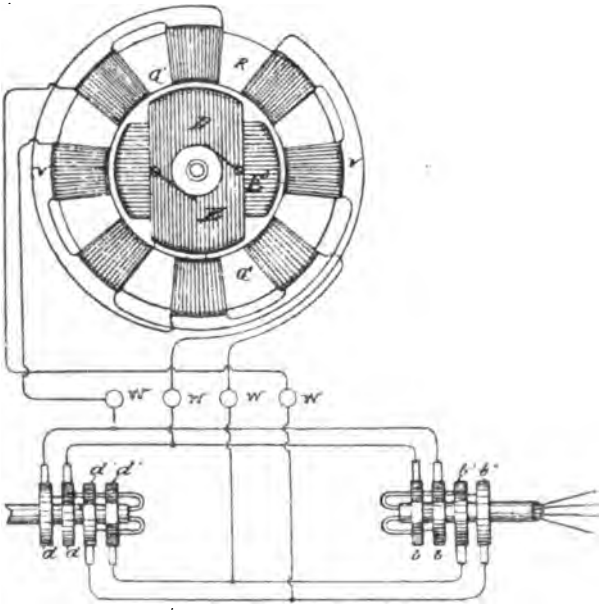


Fig. 70.

magnetisierbaren Metall frei drehbar innerhalb zweier stationärer Spulen N' N'' angeordnet, die unter rechtem Winkel zu einander stehen. Die Spulen werden am besten auf einen Rahmen O aus Isoliermaterial gewickelt und ihre Enden mit den Polklemmen T T T' T' verbunden.

Der Erzeuger G gehört zur Klasse der Maschinen für Wechselstrom. Der hier gezeichnete besteht aus einem rotierenden permanenten oder Elektromagnet A und vier unabhängigen, mit Spulen umwickelten stationären Magneten P P', wobei die diametral gegenüberliegenden Spulen in Hintereinanderschaltung

verbunden und mit ihren Enden an den Polklemmen $t\,t\,t'\,t'$ befestigt sind. Von diesen Polklemmen werden die Ströme nach den Polklemmen $T\,T\,T_1\,T_1$ des Motors geleitet, wie in der Zeichnung veranschaulicht.

Die Wirkungsweise ist im wesentlichen dieselbe wie in den vorhergehenden Fällen, indem die Ströme, welche die Spulen des Motors durchlaufen, die Scheibe D sich zu drehen veranlassen. Diese Konstruktion bietet den Vorteil, dafs man die gleitenden Kontakte in dem System entbehren kann.

In den vorbeschriebenen Ausführungsformen des Motors ist nur eines der Elemente, der Anker oder der Feldmagnet, mit erregenden Spulen versehen. Es erübrigt daher noch zu zeigen, wie beide Elemente mit Spulen umwickelt sein können, zu welchem Zwecke auf die Fig. 70 verwiesen wird.

Diese Figur bietet eine Endansicht eines solchen Motors mit im Entwurfe dargestellten Verbindungen und Fig. 71 ist eine Ansicht des Erzeugers mit dem magnetischen Felde im Schnitte. In Fig. 70 besteht der Feldmagnet des Motors aus einem Ringe R, der am besten aus dünnen isolierten Eisenblechen mit acht Polstücken G' und entsprechenden Aussparungen mit hineingewickelten vier Paar Spulen V gebildet wird. Die diametral gegenüberliegenden Spulenpaare sind in Hintereinanderschaltung verbunden und die freien Enden an vier Polklemmen W befestigt; in Bezug auf die Herstellung der Verbindungen gelten hier dieselben Vorschriften wie oben.

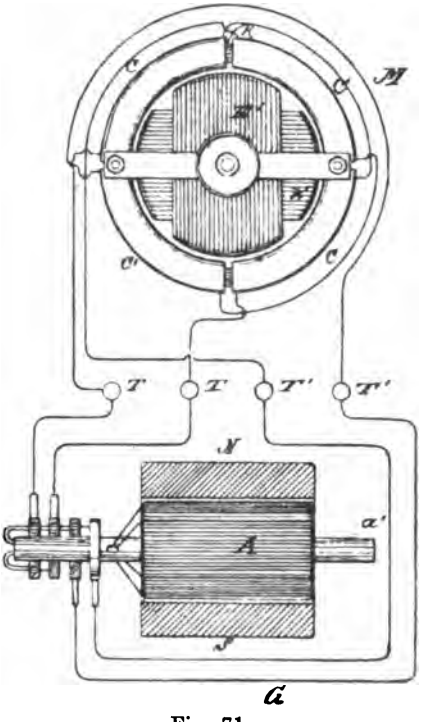


Fig. 71.

Ein mit zwei Spulen $E\,E'$ unter rechten Winkeln zu einander versehener Anker D ist innerhalb des Feldmagneten R

drehbar angeordnet; die Enden der Ankerspulen sind mit zwei Paaren Kontaktringe $d\,d\,d'\,d'$ verbunden.

Der Erzeuger für diesen Motor kann von beliebiger geeigneter Art sein, um Ströme von der gewünschten Art zu erzeugen. Im vorliegenden Falle besteht derselbe aus einem magnetischen Felde $N\,S$ und einem Anker A mit zwei rechtwinklig zu einander liegenden Spulen, deren Enden mit vier von ihrer Welle getragenen Kontaktringen $b\,b\,b'\,b'$ verbunden sind.

Die Stromkreisverbindungen werden zwischen den Ringen auf der Erzeugerwelle und denen auf der Motorwelle durch Schleiffedern und Drähte hergestellt, wie früher beschrieben. Um den Feldmagnet des Motors indessen gehörig zu erregen, werden die Verbindungen mit den Ankerspulen durch nach denselben führende Drähte so hergestellt, dafs während der Verschiebung der Punkte von gröfster Anziehungskraft oder gröfster Dichtigkeit der magnetischen Kraftlinien auf dem Anker in der einen Richtung diejenigen auf dem Elektromagnet in entgegengesetzter Richtung fortzuschreiten veranlafst werden. In den übrigen Beziehungen ist die Wirkungsweise übereinstimmend mit der in den früheren Fällen beschriebenen.

Diese Anordnung hat eine vermehrte Umdrehungsgeschwindigkeit zur Folge.

In Fig. 70 sind beispielsweise die Polenden eines jeden Satzes Feldspulen mit den Drähten der Armaturspulen in solcher Weise verbunden, dafs die Feldspulen entgegengesetzte Pole vor den Polen des Ankers beibehalten.

In den Zeichnungen befinden sich die Feldspulen in Nebenschufs mit dem Anker, können aber auch in Hintereinanderschaltung oder in unabhängigen Stromkreisen angeordnet sein.

Fig. 71 stellt einen der Fig. 64 ähnlichen Entwurf dar und veranschaulicht eine Abänderung des Motors. In dieser Figur sind die verschiedenen Teile dieselben wie in Fig. 64, ausgenommen, dafs der Ankerkern des Motors, der ein Zylinder oder eine Scheibe ist, unter rechten Winkeln zu einander mit zwei Spulen umwickelt ist. Die beiden Spulen bilden unabhängige geschlossene Stromkreise.

Wenn ein derart konstruierter Motor frei läuft, so findet die Drehung des Ankers gleichzeitig mit der Drehung der Pole im Felde statt, und unter diesen Umständen wird nur sehr wenig Strom

in den Spulen C' C bemerklich, bei verringerter Geschwindigkeit aber werden die Ströme in der Spule so verstärkt, dafs die drehende Wirkung in demselben Verhältnisse vermehrt wird.

Dieses Konstruktionsprincip läfst viele abgeänderte Anordnungen zu, von denen die meisten von selbst aus den beschriebenen Konstruktionen sich ergeben; so können beispielsweise der Anker oder die induzierten Spulen, oder diejenigen, in welchen die Ströme durch Induktion entstehen, festliegend sein und die wechselnden Ströme vom Erzeuger mittels geeigneter gleitender Kontakte durch die drehenden induzierenden oder Feldspulen geleitet werden. Es ist ebenso ersichtlich, dafs die induzierten Rollen beweglich und die magnetischen Teile des Motors fest sein können.

Ein charakteristisches Merkmal der in Gemäfsheit dieses Grundgedankens konstruierten und bethätigten Motoren ist das denselben innewohnende Vermögen der fast augenblicklichen Umsteuerung infolge der Wendung eines der erregenden Ströme vom Erzeuger.

Dieses wird verständlich aus einer Betrachtung der Arbeitsbedingungen. Angenommen, der Anker drehe sich in einer bestimmten, der Bewegung der verschiebenden Pole folgenden Richtung und die Verschiebungsrichtung werde dann umgewendet, was durch Umkehrung der Verbindungen eines der beiden erregenden Stromkreise geschehen kann, so ist es, wenn man berücksichtigt, dafs die in einer dynamoelektrischen Maschine entwickelte Kraft ziemlich genau proportional ist dem Kubus der Geschwindigkeit, augenscheinlich, dafs in einem solchen Augenblicke eine aufserordentliche Kraft zur Wirkung kommt, um den Motor umzusteuern.

Anstatt der in der Zeichnung veranschaulichten Feldmagnete können für die Motoren durch einen kontinuierlichen Strom erregte Weicheisen-Feldmagnete angewendet werden.

Dieser Vorschlag bietet grofse Vorteile, aber es ist charakteristisch, dafs, wenn in einem derart bethätigten Motor der Feldmagnet durch seine Spulen stark erregt wird und die Stromkreise durch die Ankerspulen geschlossen werden (wobei eine bestimmte Geschwindigkeit für den Erzeuger angenommen ist), der Motor nicht angeht, dafs aber, wenn das magnetische Feld nur wenig erregt oder im allgemeinen in solchem Zustande ist, dafs die

magnetische Influenz des Ankers das Übergewicht hat, der Motor zu bewegen sich anfängt und bei genügendem Strom seine normale oder maximale Geschwindigkeit erreicht. Aus diesem Grunde ist es wünschenswert, beim Angehenlassen und bis der Motor seine normale Geschwindigkeit fast oder ganz erreicht hat, den Stromkreis des magnetischen Feldes offen zu halten oder doch nur wenig Strom den Durchgang durch denselben zu gestatten.

Eine andere Eigentümlichkeit dieses Motors ist, dafs seine Umdrehungsrichtung nicht durch Umwenden der Richtung des durch die Feldspulen gehenden Stromes umgesteuert wird, da die Drehungsrichtung nicht von der Polarität des Feldes, sondern von der Richtung abhängt, in welcher die Pole des Ankers verschoben werden. Behufs Umsteuerung des Motors müssen die Verbindungen eines jeden der erregenden Stromkreise umgekehrt werden.

Wenn die Felder sowohl des Erzeugers als auch des Motors stark erregt werden, so hat ein Angehenlassen des Erzeugers eine Bewegung des Motors zur Folge und nimmt die Bewegung des letzteren gleichzeitig mit dem Erzeuger zu.

Nach diesem Prinzipe konstruierte und betriebene Motoren behalten dieselbe Geschwindigkeit in allen Fällen innerhalb ihrer normalen Arbeitsgrenzen bei, und sollte durch eine plötzliche Überladung die Geschwindigkeit des Motors einmal gehemmt werden, so verringert sich auch gleichzeitig mit derselben die Geschwindigkeit des Erzeugers, wenn dessen motorische Kraft nicht zu grofs ist. Diese Eigenschaften erscheinen bei dieser besonderen Ausführungsform des Motors unter gewissen Umständen als sehr nützlich.

Nach dieser Beschreibung der Erfindung und einiger ihrer verschiedenen Anwendungsformen wird die Aufmerksamkeit auf gewisse charakteristische Eigenschaften gelenkt, welche die Erfindung bei ihrer Anwendung bietet.

Aus Betrachtung des in Fig. 64 dargestellten Motors ergiebt sich, dafs, da die Scheibe *D* das Bestreben hat, beständig den Punkten der gröfsten Anziehung zu folgen und letztere bei jeder Umdrehung des Ankers des Erzeugers einmal um den Ring herum verschoben werden, die Bewegungen der Scheibe *D* gleichzeitig mit denen des Ankers *A* stattfinden. Dieses Kennzeichen findet sich bei allen übrigen Ausführungsformen, in denen eine

Umdrehung des Ankers des Erzeugers eine Verschiebung der Pole des Motors um 360° hervorbringt.

In der besonderen, in Fig. 69 dargestellten Abänderung oder in anderen auf denselben Grundgedanken beruhenden Konstruktionsformen ist die Anzahl der aus einer Umdrehung des Erzeugerankers entstehenden wechselnden Impulse eine doppelte im Vergleich mit den vorhergehenden Fällen, und werden die Polaritäten des Motors bei einer Umdrehung des Erzeugerankers zweimal im Kreise herum verschoben.

Derselbe Effekt wird durch die Anordnung nach Fig. 70 erzielt, wo die Pole beider Elemente in entgegengesetzten Richtungen verschoben werden.

Wenn man wieder den als Vorbild für Teslas Erfindung anzusehenden Apparat der Fig. 64 betrachtet, so ergiebt sich, dafs, da die auf die Scheibe *D* ausgeübte anziehende Wirkung am gröfsten ist, wenn sich die Scheibe in ihrer gehörigen bezüglichen Stellung zu den auf dem Ring *R* entstehenden Pole befindet, d. h. wenn ihre Enden oder Pole denen des Ringes unmittelbar folgen, wird die Geschwindigkeit des Motors unter allen Umständen innerhalb der normalen Arbeitsgrenzen eine konstante.

Die Geschwindigkeit kann niemals die durch den Erzeuger bestimmte willkürliche Grenze überschreiten, und ferner ist wenigstens innerhalb gewisser Grenzen die Motorgeschwindigkeit von der Stromstärke unabhängig.

Tesla spricht sich des weiteren über seine Erfindung in folgender Weise aus:

„Es ist nicht neu, die Drehung eines Motors durch intermittierende Verschiebung der Pole eines seiner Elemente herbeizuführen. Man hat dies gethan, indem man durch unabhängige Erregungsspulen auf einem der Elemente den Strom von einer Batterie oder anderen Quelle für direkte oder kontinuierliche Leistung hindurchgehen liefs und diesen Strom dann mittels geeigneter mechanischer Vorrichtungen so wendete, dafs er durch die Spulen in abwechselnd entgegengesetzter Richtung hindurchfloſs. In solchen Fällen bleibt indessen das Potential des erregenden Stromes dasselbe und nur die Richtung desselben ändert sich. In Gemäfsheit meiner Erfindung dagegen kommen rein wechselnde Ströme zur Anwendung, und besteht die Erfindung

in der Art und Weise des Betriebes eines Apparates zur Nutzbarmachung solcher Ströme.

Der Unterschied zwischen den beiden Verfahrungsweisen ist: Durch die Erzeugung eines wechselnden Stromes, dessen jeder Impuls ein Steigen und Fallen des Potentials bedingt, werden die Zustände des Erzeugers im Motor genau wiedergegeben und die Pole kontinuierlich und nicht intermittierend vorgeschoben. Hierzu kommt, dafs die praktische Schwierigkeit der Unterbrechung oder Wendung eines Stromes von irgend einer beträchtlichen Stärke so grofs ist, dafs keine der bis jetzt bekannten Vorrichtungen die Kraftübertragung durch Umkehrung eines kontinuierlichen oder Gleichstromes in der beschriebenen Weise gewerblich verwertbar bewerkstelligen könnte."

Soweit also das Verfahren der Beeinflussung eines Elementes des Motors in Betracht kommt, gründet sich Teslas Erfindung auf die Benutzung eines wechselnden Stromes im Gegensatze zu einem gewendeten Strome oder einem Strome, welcher ein kontinuierlicher und gleichgerichteter ist und von Spule zu Spule mit Hilfe eines Kommutators, Stromwenders oder Stromunterbrechers verschoben wird. Bezüglich desjenigen Teiles der Erfindung, welcher in der gleichzeitigen Beeinflussung beider Elemente des Motors besteht, liegt die Anwendung sowohl von wechselnder als auch von gewendeten Strömen innerhalb des Bereiches des Erfindungsgedankens, obgleich der Verwendung der letztgenannten Ströme eine besondere praktische Bedeutung nicht beigemessen wird.

Tesla hat also auch an dreiphasigen Drehstrom gedacht und bezügliche Konstruktionen vorgeschlagen; er glaubte aber, dafs dazu sechs Leitungen nötig sind; eine Bedingung, durch welche die Einführung solcher Motoren im vorhinein als höchst unwahrscheinlich bezeichnet werden konnte.

Kunstphase.

Schon Ferraris hat bei seinem Experimente und bei dem von ihm konstruierten Motor gezeigt, dafs man die beiden zur Erregung der komponierenden Felder nötigen Wechselströme aus einem einzigen Wechselstrome gewinnen kann. Er erregt die das eine komponierende Feld bildende Spule mit dem primären,

die das zweite komponierende Feld bildende Spule mit dem sekundären Strome eines Transformators. Durch geeignete Wahl der Windungszahlen ist es dann leicht, die Ampèrewindungszahlen und somit die Amplituden beider einander gleich zu machen.

Der primäre und der sekundäre Strom eines Transformators sind aber stets um einen Winkel verschoben, der gröfser als 90° ist; sagen wir, er sei 135°, so würde der Radius vector, welcher sein resultierendes Feld darstellt, keinen Kreis, sondern eine Ellipse beschreiben. Bei einer Anordnung der erregenden Spulen, dafs ihre Achsen einen Winkel von 45° bilden, erhält man konstante Winkelgeschwindigkeit und konstante Feldstärke. Dieses Prinzip hat Schallenberger bei der Konstruktion seines „Elektrizitätszählers" angewendet.

Ferraris macht auch auf eine zweite Art „Kunstphase" zu erregen aufmerksam. Er bildet eine Stromverzweigung und schaltet in den einen Zweig einen möglichst kleinen Widerstand mit möglichst grofser Selbstinduktion ein, und in den anderen Zweig einen gröfseren Widerstand mit möglichst kleiner Selbstinduktion.

Die so erreichte Phasenverschiebung zwischen den Strömen beider Zweige wird dem Werte von 90° zustreben, ohne ihn je zu erreichen. Sind in diesem Falle die Ampèrewindungen in beiden Spulen gleich, so ergiebt sich eine Phasenverschiebung um 45°, und das Bild des resultierenden Feldes wird durch Fig. 72 dargestellt. (Hätte Ferraris hier die magnetischen Achsen seiner beiden Spulen um 135° gegeneinander geneigt, so hätte er einen vollständig kreisförmigen Verlauf des Feldes nach der Fig. 48 erzielt.) Diese zweite Art der Kunstphase hat auch Tesla bei seiner vierpoligen Anordnung verwendet.

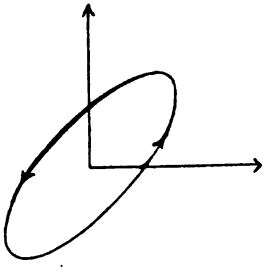


Fig. 72.

Auf diese Weise ist es also möglich, ein rotierendes magnetisches Feld zu erreichen und dieselben Erscheinungen zu veranlassen, wie wenn man einen permanenten Magneten um einen Fixpunkt rotieren läfst.

Das wurde dann später auch noch von vielen anderen Konstrukteuren auf verschiedenen Wegen erreicht und zwar:

1. Hutin u. Leblanc und Stanley u. Kelly haben die Phasenverschiebung durch Einschaltung von Kondensatoren in die Leitung erzielt.

2. Bláthy hat zum gleichen Zwecke Kondensatoren und Induktionsspulen verwendet.

3. Brown hat in der Dynamoarmatur zwei Wickelungen angebracht, von denen eine nach dem Prinzipe des Ringes, die andere nach dem Prinzipe der Trommel gewickelt war.

4. Zipernowsky und Déri verwendeten in der Dynamo mehr Anker als Magnetspulen und

5. dieselben haben auch zur Erzielung der Phasendifferenz zwei Wechselstrom-Maschinen, deren Polstellung gegeneinander verschoben ist, direkt zusammengekuppelt.

Aufserdem giebt Kratzert (E. T. Z. 1893, Heft 19) noch folgende Methoden an:

6. Man nimmt zum Ankeraufbau nur an symmetrisch gelegenen Stellen Eisen, oder man giebt dem Ankereisen symmetrisch verschiedene Eisenquerschnitte.

7. Die einzelnen Teile der Wickelungen erhalten verschiedene Windungszahlen oder verschiedene Widerstände, je nachdem sie von Strömen verschiedener Phase durchflossen werden sollen; u. s. f.

Es würde zu weit führen, alle bekannten Möglichkeiten, Kunstphase zu erzeugen, hier aufzuzählen oder gar eingehender zu erörtern; es seien daher des Beispieles wegen hier nur einige typische Arten der künstlichen Phasenverschiebung etwas ausführlicher dargestellt.

Carl Zipernowsky und Max Déri haben im Jahre 1888 folgende Methode, Kunstphase zu erzeugen, proponiert: Sie wiesen darauf hin, dafs man auch mit einem einzigen Stromerzeuger, der nur ein einziges Spulensystem hat, zwei Ströme erzeugen kann, die um einen Teil einer Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, wenn man den Strom der Maschine in zwei Zweigströme teilt, von denen der eine unverändert in die Leitung geht, der andere jedoch einen Stromumwandler durchfliefst und in der erregten Bewickelung desselben einen Wechselstrom mit verschobenen Stromwellen erzeugt.

Diese Schaltung ist schematisch in Fig. 73 gezeigt, wo S den Anker des Stromerzeugers und T einen Stromumwandler bedeutet.

Fig. 74 zeigt eine ähnliche Anordnung, wo S und S' entweder zwei Spulensysteme eines Stromerzeugers oder die sämtlichen Spulen zweier Stromerzeuger bedeuten. Hier geht der Strom von S unmittelbar in die Leitung, während der von S' durch den Stromumwandler verschoben wird, ehe er in den Schliefsungskreis kommt. Die Parallelschaltung der Stromerzeuger kann hier ebenso erfolgen, wie in den früher beschriebenen Fällen.

Diese Stromerzeuger geben hochgespannte Wechselströme, die in verschiedener Weise Wechselstrom-Umwandlern oder anderen Stromumwandlungs-Vorrichtungen zugeführt werden können. In diesem Falle jedoch werden die Stromumwandler in Verteilungs-

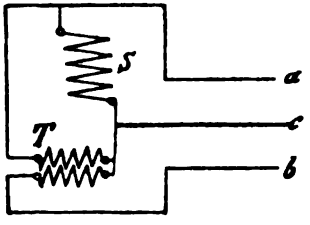


Fig. 73.

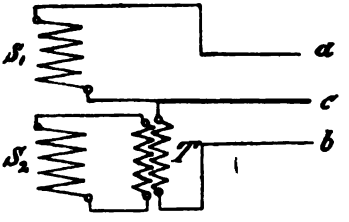


Fig. 74.

stellen zweiter Ordnung aufgestellt. Innerhalb einer jeden Gruppe können die Schaltungen der erregenden und erregten Spulen beliebig gemacht werden, je nach der vorhandenen und erforderlichen Stromstärke und Stromspannung; aber eine jede Gruppe soll immer von solchen zwei Leitungen parallel abgezweigt werden, welche zu einem Stromkreise gehören. Mehrere Gruppen können Ströme von verschobenen Phasen erhalten. Es werden dann von den Stromumwandler-Gruppen wieder mindestens $(n+1)$, dagegen höchstens $2n$-Leitungsstränge geführt, welche die Stromkreise zweiter Ordnung bilden, von denen die Verbrauchsvorrichtungen ebenfalls parallel abgezweigt sind.

Die Stellen zweiter Ordnung werden dadurch voneinander unabhängig gemacht, dafs man die Spannung der Hauptströme dort, wo dieselben in die Stellen zweiter Ordnung eintreten, möglichst konstant erhält. Hierzu bedient man sich der bekannten Kontrollvorrichtungen für Stromspannungen und verändert in der Hauptstelle entweder die Kraft der erregenden Magnete, oder schaltet in die betreffende Leitung selbst Widerstände immer in

dem Maafse ein, dafs die betreffende Spannung nach Thunlichkeit stets unverändert bleiben mufs.

Um in den Stromkreisen zweiter Ordnung verschiedene Spannungen zur Verfügung zu haben, verwendet man entweder Stromumwandler mit verschiedenen Übersetzungsverhältnissen oder teilt, wo dies notwendig ist, die Stromumwandler der Stelle zweiter Ordnung in mehrere Gruppen, welche mit ihren erregten Wickelungen hintereinander geschaltet sind, um von verschiedenen Spulenenden verschiedene Spannungsunterschiede nutzbar zu machen. Es ist auch möglich, in jedem Stromkreise zweiter Ordnung verschiedene Wechselströme von gleichen oder verschiedenen Spannungen mit gegeneinander verschobenen Stromwellen herzustellen, ohne von mehr als zwei Hauptleitungen abzuzweigen. Es geschieht dies

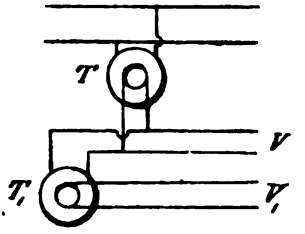


Fig. 75.

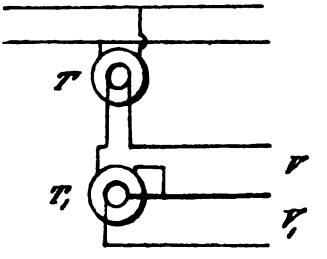


Fig. 76.

mit Zuhilfenahme von Wechselstrom-Umwandlern, und zwar, wie die Fig. 75 und 76 beispielsweise darstellen, dadurch, dafs der in dem Stromumwandler oder in der Stromumwandler-Gruppe T erzeugte Strom entweder (Fig. 75) sich verzweigend, einerseits in den Schliefsungskreis, andererseits in einen zweiten Stromumwandler T' geht, oder aber (Fig. 76) ungeteilt durch den Stromumwandler T fliefst, ehe er in den Schliefsungskreis geht, und folglich in T' einen weiteren Strom mit verschobenen Stromwellen erzeugt, welcher dann in einen eigenen Schliefsungskreis geleitet wird. Es können anstatt der vier Leitungen (Fig. 75) auch in diesem Falle drei Leitungen (Fig. 76) genügen. Die beiden Wechselströme V und V' haben dann Stromwellen, welche um einen bestimmten Teil der Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, und können je nach dem Übersetzungsverhältnisse des Stromumwandlers T' gleiche oder von einander verschiedene Stromspannungen besitzen. Fig. 77 zeigt eine elektrische Verteilungs-

anlage, wo von der Hauptstelle aus zwei Ströme mit verschobenen Phasen in einem Verteilungsstrange (d. h. zwei Hinleitungen und eine Rückleitung) den Stromumwandlern zugeführt werden.

Bei I ist von *a* und *c* nur ein Stromumwandler abgezweigt, der Lampen speist. II zeigt eine Stelle zweiter Ordnung für

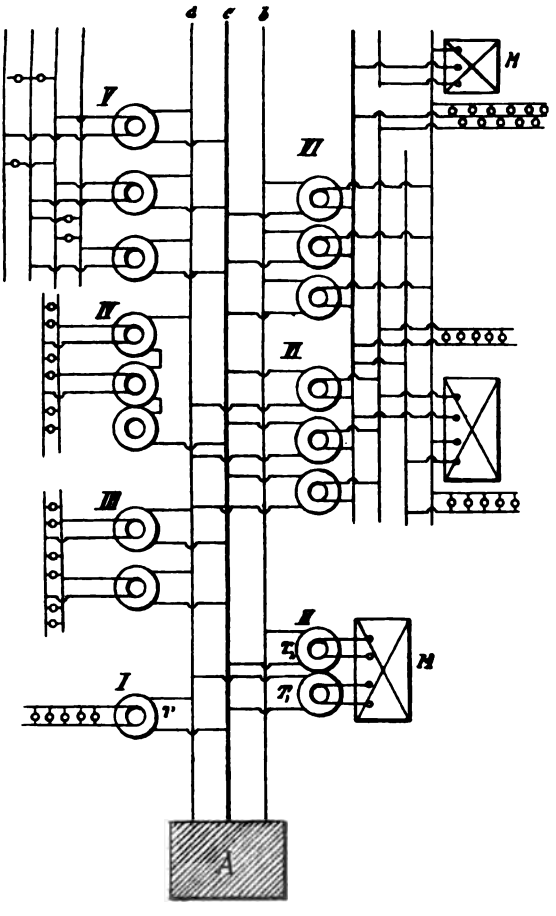


Fig. 77.

eine Kraftmaschine *M*. Ein Stromumwandler *T''* wird von *b* und *c* gespeist, ein anderer, *T'*, von *a* und *c*. Beide Stromumwandler liefern ihre Ströme, die natürlich ebenso wie die Hauptströme gegeneinander um $^1/_4$ Wellenlänge verschoben sind, einer Verbrauchsvorrichtung, z. B. einer Kraftmaschine *M*, welche die elektrische

Energie in irgend einer Weise in mechanische umwandelt. III zeigt zwei Stromumwandler, deren Spulen, sowohl die erregenden als die erregten, parallel geschaltet sind. In IV sind die erregenden Bewickelungen in Reihe, die erregten parallel geschaltet. In V sind die erregten Spulen von drei Stromumwandlern so verbunden, dafs in der Nebenanlage dreierlei Spannungen herrschen. VI zeigt mehrere Stromumwandler von *a* und *c* und mehrere Stromumwandler von *b* und *c* parallel abgezweigt, die ihre erregten Ströme in einer

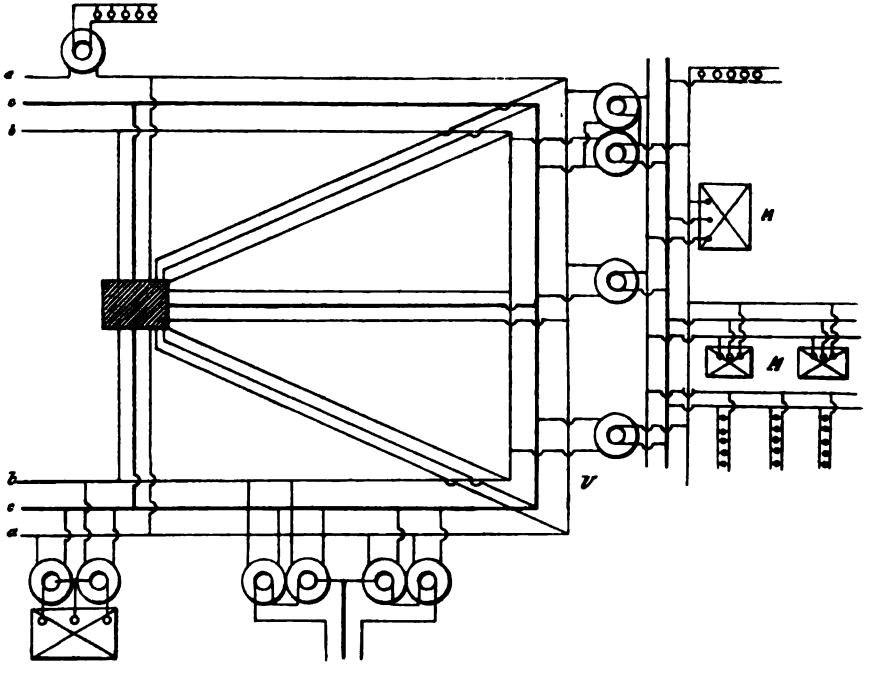


Fig. 78.

Nebenanlage von mindestens drei Hauptleitungen liefern; von dieser Anlage werden dann Kraftmaschinen, Lampen, Mefs-Kontroll-Regelungsapparate oder andere zum Verbrauch oder zur weiteren Umwandlung dienende Vorrichtungen gespeist. Hat man Kraftmaschinen zur Verfügung, die auch ohne Wirkung des Phasenunterschiedes zweier Ströme, also nur mit einem Strome arbeiten, so kann man dieselben auch einfach wie Lampen abzweigen.

Ist ein gröfserer Flächenraum mit Strömen von verschobenen Phasen zu versehen, so wendet man zweckmäfsig ein von Feldern

gespeistes Hauptnetz an, von dem die Stellen zweiter Ordnung abgezweigt sind, und zwar so, dafs auch die letzteren ganz oder teilweise ein Leitungsnetz zweiter Ordnung speisen, an welches die Verbrauchs- und sonstigen Vorrichtungen angeschlossen werden. Eine solche Anordnung ist in Fig. 78 gezeichnet. Hier ist es auch zweckmäfsig, von einzelnen Stellen des Hauptverteilungs-Netzes oder auch des Verteilungsnetzes zweiter Ordnung besondere Leitungen zu Spannungs-Kontrollvorrichtungen zurückzuführen.

Wenn einzelne Verbrauchsstellen von dem Hauptleitungsnetze zu weit entfernt sein sollten, so kann man für diese besondere Leitungsstränge legen, wie es auch überhaupt in manchen Fällen zweckmäfsig sein wird, aus einer Hauptstelle mehrere Hauptleitungsstränge zu führen, von denen jeder eine unabhängige Regelung hat.

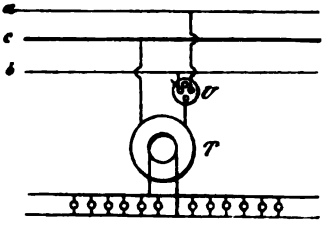


Fig. 79.

Um keine von den beiden Leitungen *a* und *b* zu überlasten, wird es zweckmäfsig sein, solche Stellen zweiter Ordnung, welche nur einen Strom brauchen, also nur den von *a* und *c* oder nur den von *b* und *c*, mit Umschaltern zu versehen, um diese Stellen zweiter Ordnung beliebig auf *a* und *b* umschalten zu können. Eine solche Anordnung zeigt Fig. 79, wo man mittels Umschalters *U* den Stromumwandler *T*, ohne die Verbindung mit der Leitung *c* zu lösen, nach Belieben auf *a* oder *b* schalten oder auch ganz ausschalten kann. Dasselbe kann man ebenso gut auf eine ganze Stromumwandler-Gruppe anwenden.

Die Anordnung der Leitungen, Stromumwandler, Verbrauchs-Mefs-Regelungs- und anderen Vorrichtungen bleibt im Wesen dieselbe, wenn man statt zweier gegeneinander verschobener Ströme *n* solche verwendet. Die Anzahl der Leitungen wechselt in diesem Falle, wie schon früher erklärt wurde, zwischen $n+1$ und $2n$.

E. A. Wahlström in Cannstatt hat 1891 (D. R. Patent 66232) ein Verfahren angegeben, um durch Spulen, deren zwei Stromkreisen angehörende Wickelungen in wechselndem Zahlenverhältnisse zu einander stehen, möglichst gleichmäfsige magnetische Drehfelder für elektrische Maschinen und Umwandler zu erzeugen.

Zur Erregung dieser Spulen sind zwei Ströme mit verschiedenen Phasen nötig, die sowohl direkt oder auch durch Kunstphase erzeugt werden können.

Nehmen wir an, es stehe ein sinusoidaler Strom zur Verfügung. Derselbe kann bekanntlich durch die Gleichung

$$y' = a \cdot \sin \alpha$$

ausgedrückt werden. Kurve 1 in Fig. 80 versinnbildlicht den Stromverlauf.

Wird nun dieser Strom durch einen Umwandler geleitet, so

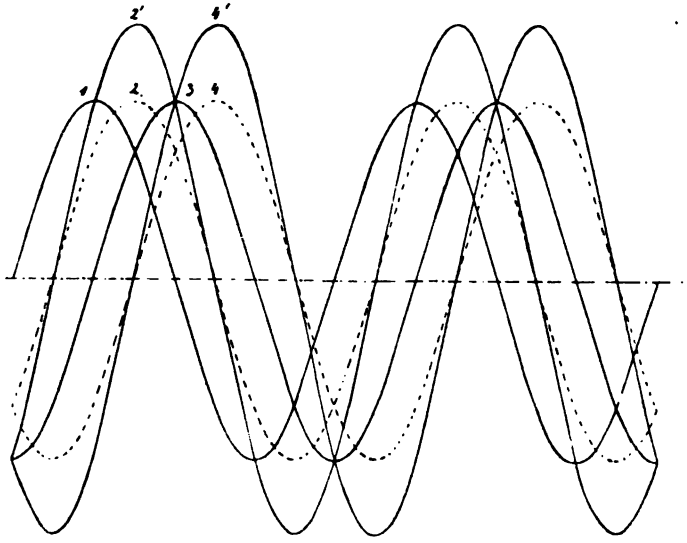


Fig. 80.

entsteht in der sekundären Wickelung, wie bekannt, ein Strom, welcher annähernd ausgedrückt werden kann durch

$$y'' = b \cdot \sin (\alpha + 90)$$

und der in Fig. 80 durch die Kurve 3 dargestellt ist. Es soll nun, um mit Hilfe dieser beiden Ströme ein gleichförmiges Drehfeld zur erzeugen, eine Erregerspule gebildet werden, deren Magnetisierungsphase um den Winkel φ verschoben ist, gegenüber der Phase, die von einer anderen Spule, in welcher der Strom gleich ist

$$y' = a \cdot \sin \alpha$$

erzeugt wird. Dies kann dadurch geschehen, dafs die betreffende

Spule aus zwei getrennten Stromkreisen gebildet wird, von denen dann ein Teil vom Strome $y' = a \cdot \sin \alpha$, der andere Teil vom Strome $y'' = b \cdot \sin (\alpha + 90)$ gespeist wird.

Die magnetisierende Wirkung der neuen Spule wird sich der Wirkung desjenigen Stromes am meisten nähern, bei welchem das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl am gröfsten ist; denn die Wirkung einer oder mehrerer von Strömen durchflossener, in-, auf- oder nebeneinander gewickelter Drahtspulen ist immer gleich der algebraischen Summe der Ampèrewindungen, wenn alle Spulen die Magnetisierung in gleichem Sinnne bewirken.

In diesem Falle wäre also, wenn die Windungszahl für den Strom $y' = a \cdot \sin \alpha$ mit w' und die Windungszahl für den zweiten Strom $y'' = b \cdot \sin (\alpha + 90)$ mit w'' bezeichnet würde, die Wirkung der neuen Spule $w' y' + w'' y''$ oder

$$w' \cdot a \cdot \sin \alpha + w'' \cdot b \cdot \sin (\alpha + 90).$$

Die Summe von zwei Sinuslinien ist aber immer wieder eine Sinuslinie. Man kann daher statt der vorstehenden Ausdrücke setzen

$$C \cdot \sin (\alpha + \varphi),$$

wobei C eine Konstante und φ den Winkel der Phasenverschiebung des Stromes der neuen Spule, gegenüber dem Strome der Spule bedeutet, welch letzterer von $y' = a \cdot \sin \alpha$ durchflossen wird.

Es soll nun bestimmt werden, wie viel Windungen verwendet werden müssen, um mit der neuen Spule den nötigen Magnetismus und die gewünschte Phasenverschiebung zu erzielen. Hierzu kann man die Gleichung

$$C \cdot \sin (\alpha + \varphi) = w' a \cdot \sin \alpha + w'' b \cdot \sin (\alpha + 90)$$

benutzen. Setzt man z. B. $\varphi = 30^0$ und sind die Konstanten a, b und C bekannt, dann erhält man:

$$w' = \frac{C\sqrt{3}}{2a} \text{ und } w = \frac{C}{2b}.$$

Ergiebt die Rechnung Resultate mit negativen Vorzeichen, so entspricht man der Subtraktion durch entgegengesetztes Wickeln der betreffenden Spule. Man kann auf diese Weise mit Hilfe zweier Wechselströme Spulen zu jeder beliebigen Phasenverschiebung herstellen. Wahlström verwendet nun derartige Wickelungen zur Erzeugung von Drehfeldern, indem er dieselben ihrer Phasen-

verschiebung entsprechend hintereinander anordnet, wobei auch Spulen, welche nur von einem der beiden zur Verfügung stehenden Ströme erregt werden, zur Verwendung kommen.

Die einzelnen Spulen, welche von Strömen mit gleichen Phasen durchflossen werden, können entweder hintereinander, wie in Fig. 81 angenommen ist, oder parallel geschaltet werden. Wir sehen in der Figur schematisch eine solche Anordnung, wobei angenommen ist, dafs der Hauptstrom durch den Leiter AB, durch

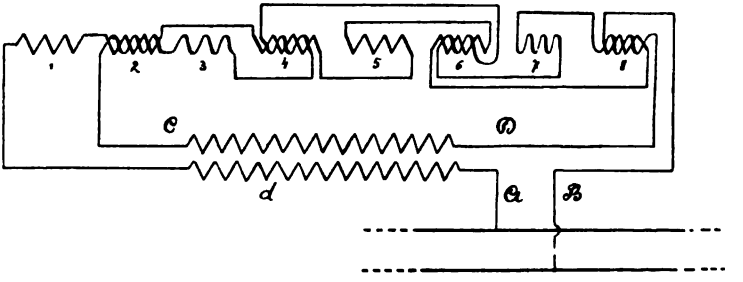


Fig. 81.

die Primärwickelung des Umwandlers CDd, sowie auch unmittelbar durch eine Gruppe der Spulen, welche das Drehfeld erzeugen, fliefst. Die zweite Gruppe dieser Spulen wird von der Sekundärwickelung des Umwandlers gespeist.

Es sind acht Spulen angenommen, wovon die Spulen 1 und 5 von dem Hauptstrome, 3 und 7 vom Sekundärstrome erregt werden. Das Feld soll ein zweipoliges sein. Die Spulen 2, 4, 6 und 8 werden nach der vorbeschriebenen Methode gewickelt und zwar mit der Bedingung, dafs die Magnetisierungsphase der Spule 2 in der Mitte zwischen den Magnetisierungsphasen der Spulen 1 und 3, die der Spule 4 zwischen 3 und 5, die der Spule 6 zwischen 5 und 7 und die der Spule 8 zwischen 7 und 1 zu liegen kommt. Da das Feld zweipolig ist, werden die Pole in einer Entfernung von vier Spulen voneinander liegen; es werden also die Spulen 1 und 5, 2 und 6, 3 und 7, 4 und 8 entgegengesetzte Pole besitzen.

Die Spulen 1 und 5 erhalten nun, da sie mit demselben Strome erregt werden, entgegengesetzte Pole, sobald ihre Wickelungsrichtung einander entgegengesetzt ist, ebenso die Spulen 3 und 7.

Die Spulen 1 und 3 haben circa 90° Phasenverschiebung gegeneinander, da dieselben mit zwei Strömen, welche 90° Phasenverschiebung haben, erregt werden. Dasselbe gilt für 3 und 5, sowie für 5 und 7. Die zwischenliegenden Spulen 2, 4, 6 und 8 sollen damit gegen die vorhergehende Spule eine Phasenverschiebung von 45° nach vorwärts und 45° nach rückwärts gegen die nachfolgende Spule bekommen. Würden wir die Windungszahl mit jedem Drahte in der Spule 2 gleich der Windungszahl der Spulen 1 und 3 machen, so wird die Bedingung der Phasenverschiebung hierdurch erfüllt, sobald der sekundäre dem primären Strome gleich ist, was durch die Anordnung des Umformers erzielt werden kann. Aber die magnetisierende Wirkung der Spule 2 würde gröfser werden, als diejenige der Spulen 1, 3, 5 und 7. Dies wäre aber für ein Drehfeld von Nachteil und läfst sich dadurch vermeiden, dafs die Windungszahl der beiden Drähte in demselben Verhältnisse vermindert wird, wie die Magnetisierung zu grofs war.

In Fig. 80 ist dies durch Kurven dargestellt, und es bedeutet die Kurve 1 die magnetisierende Wirkung durch den Primärstrom, die Kurve 3 diejenige durch den Sekundärstrom und die Kurve 2′ die Summe beider, falls dieselben mit gleicher Windungszahl ineinander gewickelt sind. Vermindert man die Windungszahl in demselben Verhältnisse, wie die Kurve 2′ höher ist, als die Kurve 1, so entsteht die Kurve 2, welche die Magnetisierung durch die entsprechend gewickelte Doppelspule darstellt. Dieselbe ist gleich hoch wie die Kurven 1 und 3 und hat die gewünschte Phasenverschiebung von 45° gegen 1.

Die Spule 4 wird nun in derselben Weise hergestellt, wie die Spule 2, nur mufs dieselbe eine Phasenverschiebung von 45° gegen die Spule 3 bekommen, was dadurch erreicht wird, dafs die beiden Wickelungen der Spule gegeneinander wirken. Dies wäre aus den Kurven 1, 3 und 4′ ersichtlich; denn die Kurve 1 von 3 subtrahiert giebt Kurve 4′ und durch Verringerung der Windungszahl entsteht die Kurve 4. Die Spule 6 entsteht dadurch, dafs ihre Schaltung bezw. Wickelung der Spule 2 entgegengesetzt gerichtet wird; auf gleiche Weise entsteht Spule 8 aus Spule 4. Die entsprechenden Kurven sind in Fig. 82 enthalten, wo die Magnetisierung der Spulen 1 bis 8 durch die Kurven 1 bis 8 ersichtlich ist. Will man zwischen den Spulen 1 und 3, 3 und 5,

5 und 7, 7 und 1 jedesmal mehr als eine Spule einlegen, so ist das Verfahren dasselbe, wie im Anfange beschrieben. Beabsichtigt man die Spulenzahl für jeden Pol zu erhöhen, so kann man z. B. zwischen die beiden um 90° verschobenen Ströme zwei Spulen setzen, deren

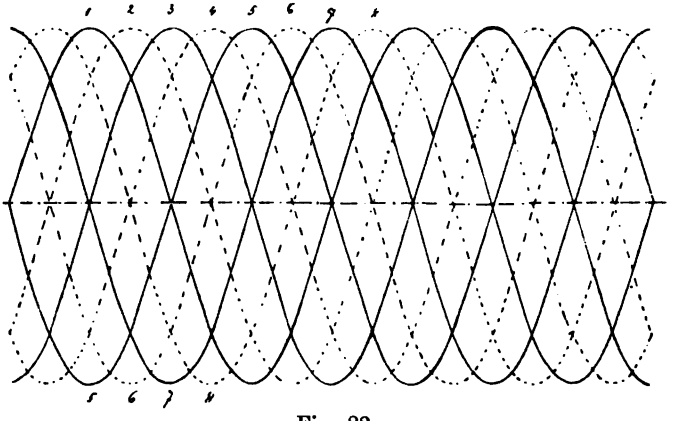


Fig. 82.

magnetisierende Wirkungen gegeneinander, sowie gegen die beiden ursprünglichen Spulen 30° beträgt; sollen drei Spulen zwischengeschaltet werden, so müssen deren Magnetisierungsphasen um 22,5° gegeneinander, sowie auch 22,5° gegen die magnetisierende Wirkung der beiden ursprünglichen Spulen verschoben sein.

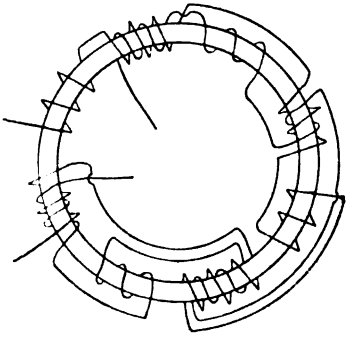


Fig. 83.

Die Fig. 83 stellt einen Ring dar, welcher mit einer zweipoligen achtspuligen Wickelung versehen ist; wird dieselbe mit Strom erregt und mit innen oder aufsen angebrachtem Anker versehen, welcher eine gleiche, aber in sich kurz geschlossene Wickelung haben kann, so würde eine Maschine entstehen. Die Wickelung kann in eine Trommelwickelung übergehen, sobald zwei Spulen, welche um einen Polabstand voneinander entfernt liegen, zu einer Spule verwandelt werden, genau wie bei Gleichstrom-Maschinen. Wird der in Fig. 83 dargestellte Ring mit erregenden Magneten aufsen oder innen versehen, so würde eine Zweiphasen-Wechselstrom-Maschine

entstehen und die beiden Ströme können mittels eines Umwandlers (siehe Fig. 80), zu einem Strome zusammengesetzt werden.

Wird die Wickelung in sich kurz geschlossen, so entsteht der Anker einer Drehstrom-Treibmaschine.

Wird auf dem Ringe (in Fig. 83) eine sekundäre Wickelung angebracht, welche mit Abzweigungen wie die Abzweigungen nach dem Stromwender eines Gleichstrom-Ankers versehen ist, und die primäre Wickelung mit Wechselstrom so erregt, dafs ein Drehfeld entsteht, so werden in der sekundären Wickelung Wechselströme induziert, welche von den Abzweigungen abgenommen werden können. Die Ströme lassen sich auch mit Hilfe eines Stromwenders in Gleichstrom verwandeln.

Die Fig. 84 und 85 stellen Schnitte der Spulen eines Drehfeldes dar und zeigen, wie die einzelnen Wickelungen angeordnet

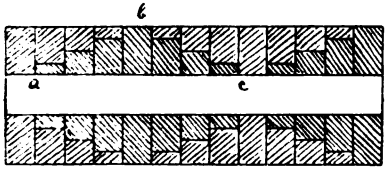


Fig. 84.

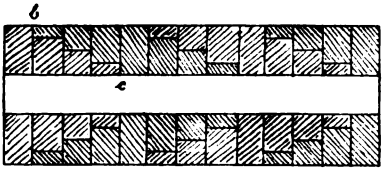


Fig. 85.

sein können. Wird die Spulenzahl grofs, so werden die Zickzacklinien *a-b* und *b-c* in Kurven übergehen, als wenn es nicht viele getrennte, sondern nur wenige ineinander greifende Spulen wären. Ist die Wickelungshöhe klein, so z. B. eine Lage, so würden eine oder mehrere Windungen von einer Spule mit den Windungen der anderen Spule abwechseln. Es war bis jetzt angenommen, dafs die zwei Ströme 90° Phasenverschiebung haben; dies ist jedoch nicht notwendig und wird in der Praxis selten vorkommen, wenn der zweite Strom nicht auf andere Weise als durch Umwandlung erzeugt wird. Die thatsächliche Phasenverschiebung läfst sich jedoch leicht bestimmen und kann dann die Wickelung dementsprechend gemacht werden.

Diese Darstellungen Wahlströms sind nun allerdings sehr kompliziert und zur praktischen Ausführung dürften diese Ideeen wenig geeignet sein; immerhin bilden sie eine schätzenswerte Entwickelungsstufe in der Bildung von Drehfeldern und dürfte das Studium von Wahlströms Konstruktionen manchen Nutzen bringen.

Rekapitulieren wir:

Die Anwendung mehrerer zeitlich gegeneinander verschobener Wechselströme zum Antriebe elektrischer Kraftmaschinen hat sich, wie wir schon aus diesen mehr theoretisch gehaltenen Erörterungen ersehen können, als durchführbar und nutzbringend erwiesen. Wir erhalten dabei eine bessere Ausnutzung der Stromerzeuger gegenüber der Anwendung einfacher Wechselströme; die Kraftmaschinen gehen mit mäfsiger Belastung an und bleiben bei Überlastung wenigstens nicht sofort stehen.

Schon die Grammesche Wechselstrom-Maschine liefert aus getrennten Spulensätzen gegeneinander verschobene Wechselströme. Die von Ferraris zunächst erzielte Erscheinung des kreisenden Magnetfeldes, als Ergebnis zweier in der Phase verschobener Wechselströme nützten Tesla, Bradley und Haselwander durch Konstruktionen aus, die sich als durchführbar erwiesen haben. Alle drei blieben vorerst bei der von Ferraris gewählten Stromphasen-Verschiebung um 90° bezw. $^1/_4$ Periode.

Wir müssen hier einfügen, dafs zu jener Zeit auch Schallenberger ein Amerikanisches Patent (Nr. 412 932) erhielt, aus welchem ersichtlich ist, dafs auch er zwei Ströme von je 90° Phasenunterschied anwendete, dabei aber auch ebenso wie Tesla eine gemeinschaftliche Rückleitung benutzte.

Auch Zipernowski und Deri sowie Wahlström u. a. m. haben sich mit diesem Thema beschäftigt; in die Praxis wurden aber um 90° verschobene Wechselströme nur nach dem System Bradley von „Schuckert“ und nach System Tesla von der „Westinghouse Electric Company“ eingeführt.

Wir werden sehen, dafs gleichzeitig mit der Einführung des zweiphasig erzeugten Drehfeldes, v. Dobrowolsky in Berlin eine Konstruktion erzielte, welche ein konstantes, nicht pulsierendes Drehfeld lieferte, wodurch die weitere Einführung und Ausnutzung des Drehstrom-Systems inauguriert und um so mehr gesichert wurde, als die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, verbunden mit der Fabrik „Oerlikon“, sofort eine Drehstrom-Anlage im grofsen Stile projektierte und mit allgemein überraschendem Erfolge 1891 in Frankfurt a. M. ausgeführt hat.

B.

Drehfeld mit dreiphasigem Wechselstrom.

Zur Erzeugung eines Drehfeldes kann man n-Wechselströme anwenden und letztere in der Phase um $\frac{180}{n}$ Grad verschieben; man erhält dann n magnetische Felder, welche zu einander die Richtung $\frac{180}{n}$ Grad haben. Die Intensität des konstanten Feldes, welches daraus resultiert, wird den Wert $\frac{n}{2}H$ erhalten und sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit drehen, und zwar um volle 360° während einer Periode. Je gröfser der Wert n, desto gleichmäfsiger ist das Feld. Diese Vergröfserung des Wertes von n veranlafst aber den fühlbaren Nachteil, dafs die Zahl der nötigen Leitungen und somit die Kosten der Anlage unverhältnismäfsig gesteigert werden. Wir haben ferner in den Erörterungen auf Seite 87 darauf hingewiesen, wie insbesondere beim zweiphasigen Drehstrom Pulsationen des Drehfeldes entstehen, die als Nachteil bezeichnet werden müssen, wenn es sich um den Betrieb von Motoren handelt.

v. Dobrowolsky hat nun, und zwar schon im Jahre 1888, versucht, drei Wechselströme, die in der Phase um 120° gegeneinander verschoben sind, zur Erzeugung eines Drehfeldes zu benutzen, und erzielte ein vortreffliches Resultat, wie wir dies bei den an anderer Stelle zu besprechenden D. R. Patent der A. E.-G. (Nr. 51 083 vom 8. März 1889) beweisen werden. Damit war der dreiphasige Drehstrom inauguriert.

F. A. Haselwander in Offenburg (Baden) erhielt am 30. Juni 1889 ein Deutsches Reichspatent Nr. 55 978 unter dem Titel „Fernleitungs-System für Wechselströme“, in welchem er eine Darstellung des zweiphasigen und dreiphasigen Drehstromes erläutert, ein Patent, das später als nichtig erklärt worden ist.

Ferner finden wir auch in der amerikanischen Patentrolle eines unter Nr. 409 450 de dato 20. August 1889, in welchem

Charles S. Bradley nicht nur die Prinzipien, sondern auch die zu bezüglichen Konstruktionen nötigen Anhaltspunkte für ein dreiphasiges Drehstrom-System erörtert und sich auf ausführbare Dynamos und Motoren bezieht.

Schliefslich hat auch Jonas Wenström in Örebro (Schweden) am 12. Juni 1890 das Prinzip eines vollständigen Dreiphasen-Drehstrom-Systems veröffentlicht und zwar mittels eines Schweizer Patentes.

Über diese einzelnen Systeme werden wir später ausführlich sprechen; vorerst wollen wir die Erzeugung eines dreiphasigen Drehfeldes und dieses selbst etwas eingehender betrachten.

Wir haben schon früher gesehen, wie man eine gewöhnliche Gleichstrom- zu einer einfachen Wechselstrom-Dynamo umgestalten, oder aus ersterer auch zweiphasigen Wechselstrom entnehmen kann (Fig. 26 Seite 41 und Fig. 57 Seite 92). Wir wollen die dort eingeleitete Darstellung beibehalten und sehen in Fig. 86 wieder einen Gramme-Ring im magnetischen Felde. Diesmal sind aber drei Punkte der Ankerwickelung mit je einem auf der Ankerachse aufgesetzten Schleifringe verbunden. Diese drei Punkte sind um 120° gegeneinander versetzt. Es ist nach den schon früher gebrachten Erörterungen wohl völlig klar, dafs wir hier aus jeder der drei Spulen einen, also zusammen drei Wechselströme erhalten, wenn wir diese Armatur in einem magnetischen Felde drehen; dafs diese Ströme nach den wohlbekannten Magnetoinduktions-Gesetzen beurteilt werden müssen, daher sinusoidal verlaufen und in der Phase um 120° zu einander verschoben sind.

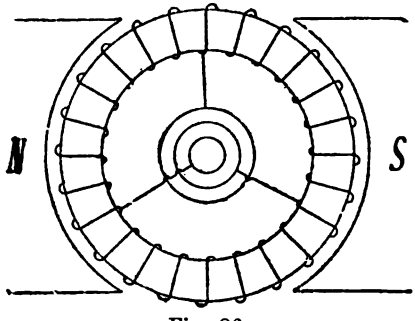


Fig. 86.

Das nebenstehende Diagramm Fig. 87 giebt uns den weiteren Aufschlufs.

I. Falls der Punkt *S* die Spule I darstellt, welche im magnetischen Felde rotiert, erhalten wir einen elektrischen Induktionsstrom, dessen Kurve bezüglich Stromintensität und Richtung durch die hinter dem Kreise stehende krumme Linie (eine Sinuskurve) angedeutet ist, und wir wollen annehmen, dafs derselbe

vom Nullpunkte bezw. vom Anfangspunkte unserer Beobachtung ausläuft.

II. Gleichzeitig erhalten wir aber auch aus der Spule II, welche durch den Punkt S' markiert wird, einen Induktionsstrom; derselbe beginnt jedoch nicht beim Nullpunkte des Stromes I,

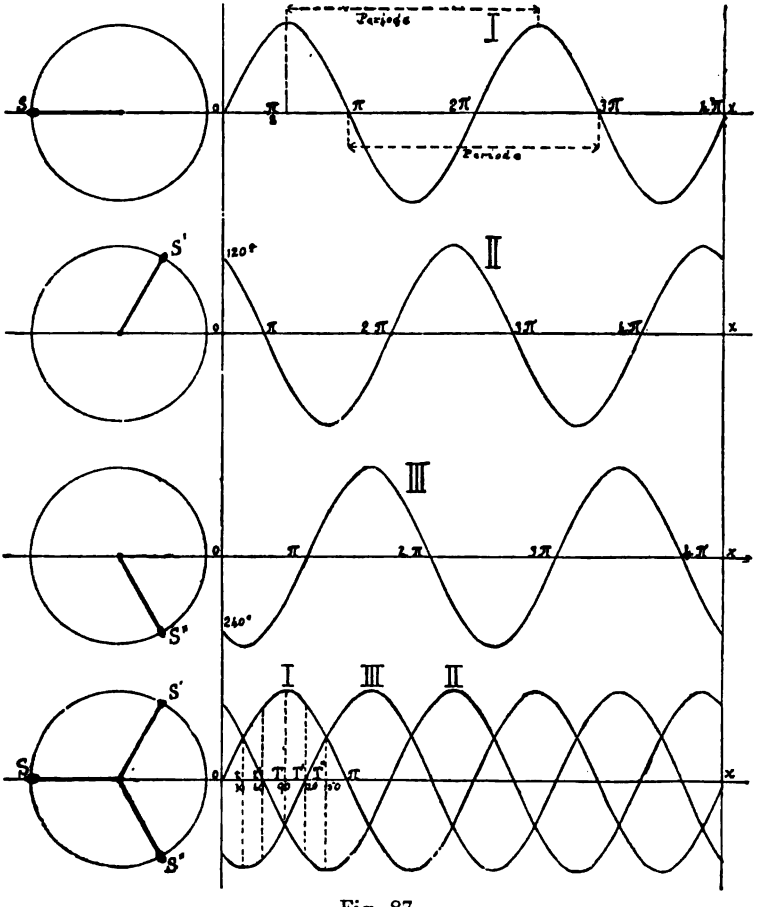


Fig. 87.

sondern er ist der räumlichen Stellung von S' zu S entsprechend um 120° in der Phase versetzt, verläuft aber sonst wie der Strom I in der Sinuslinie, wie dies auch durch die Kurve II veranschaulicht ist. Sowohl die Strommaxima als auch die Nullpunkte dieser beiden Ströme folgen demnach in einem Abstande von 120°.

III. Die Spule S'' giebt bei der Rotation ebenfalls einen Induktionsstrom, und zwar verläuft derselbe nach der Kurve III; weil aber diese Spule 120° gegenüber S' und 240° gegenüber der Spule S räumlich verschoben ist, so müssen wir auch den Beginn dieser Stromkurve III und deren Maximum gegenüber dem Maximum und dem Nullpunkte des Stromes I um 240° versetzen, was in der Kurve III geschehen ist.

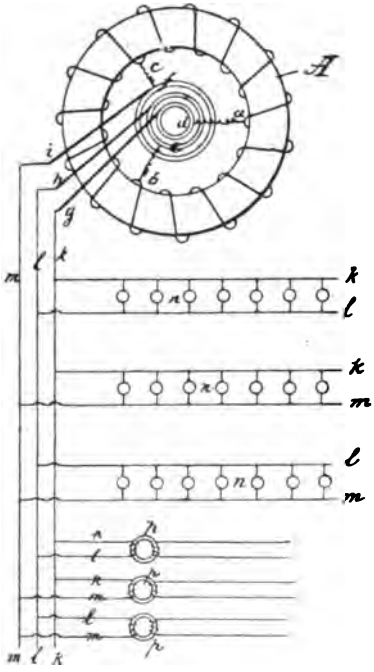


Fig. 88.

Nachdem sich nun diese drei Ströme gleichzeitig entwickeln, so ist es auch nötig, dieselben in ihrer Gesamtheit zu betrachten, was durch die unterste Abteilung der Fig. 87 erleichtert wird. Jede der Spulen giebt bei der Rotation gleichzeitig Strom; die Spulen sind räumlich um 120° bezw. 240° gegeneinander im magnetischen Felde versetzt, infolgedessen sind auch die Induktionswirkungen, d. h. die Ströme in der Phase, um 120° bezw. 240° zu einander verschoben und wir erhalten auf diese Weise „dreiphasigen Wechselstrom“ oder, wie ihn Dobrowolsky nennt, „dreiphasigen Drehstrom“.

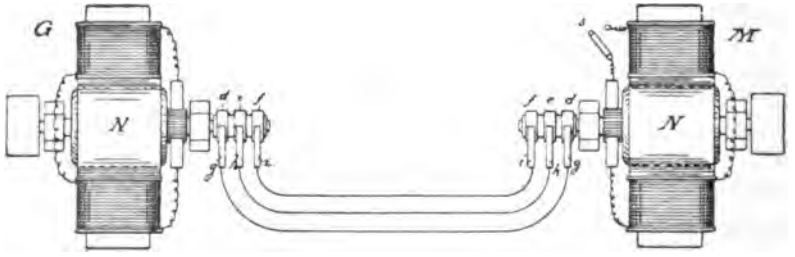


Fig. 89.

Für die einzelnen Ströme gelten jene Gesetze, die wir bei der Besprechung des Wechselstromes kennen gelernt haben.

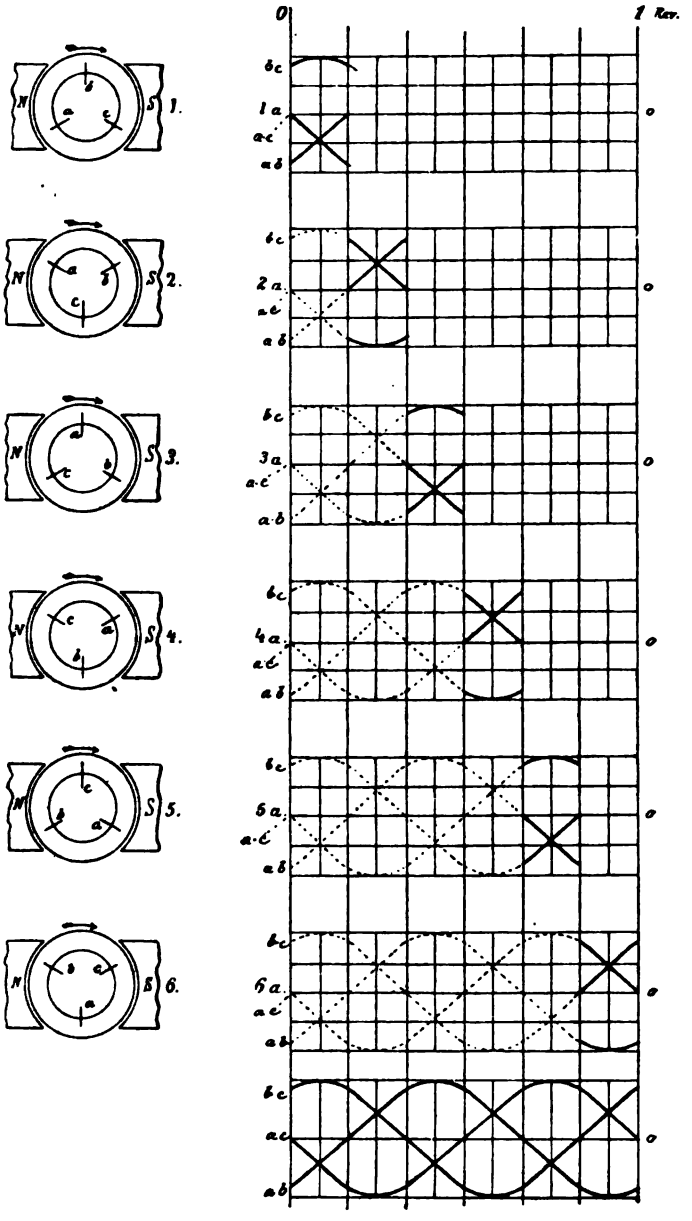


Fig. 90.

Die Fig. 88 und 89 zeigen die Anordnung des dreiphasigen Drehstromes zur Beleuchtung, Transformation und direkten Aus-

nutzung beim Motorbetrieb nach den Angaben des C. S. Bradley (20. Oktober 1888).

Die Fig. 90 giebt ebenfalls eine Darstellung der Kurvenentwickelung mit Beziehung auf die jeweilige Stellung der drei Spulen im magnetischen Felde, und ist das Studium dieser von Bradley entworfenen Figur gewifs geeignet, das Verständnis der Vorgänge in den drei Leitern ganz besonders zu fördern.

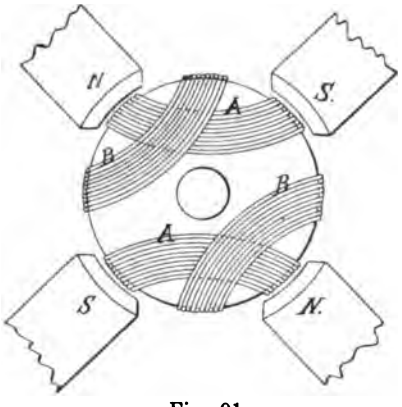


Fig. 91.

Die Figuren der Tafel IV erläutern jene Konstruktionen, welche Tesla bezüglich der Anwendung von drei Leitern im Drehstrom-Systeme (10. April 1888) proponierte. Wir ersehen aus diesen Darstellungen, dafs Tesla die eine Leitung hauptsächlich als Rückleitung für die Ströme der beiden anderen Leitungen benutzt, während Bradley das reine System des dreiphasigen Drehstromes erfunden hat.

O. B. Schallenberger veröffentlichte ebenfalls im Jahre 1888 (25. August) ein Kraftverteilungs-System nach folgend be-

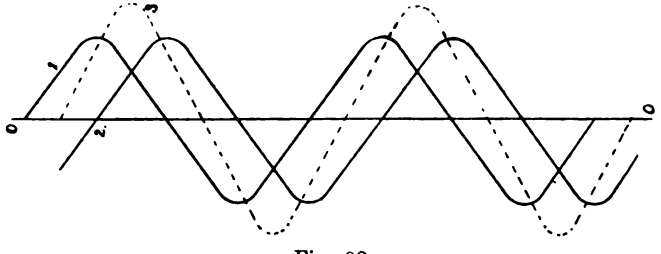


Fig. 92.

schriebenen Principien: Auf einen eisernen Anker waren Drähte *AA* und *BB* so aufgewickelt, wie es die Fig. 91 zeigt. Diese Armatur rotierte in einem vierpoligen magnetischen Felde und erzeugte Ströme, wie dieselben in Fig. 92 durch die Linien *1* und *2* diagrammatisch dargestellt sind. Aus diesen beiden Strömen

ergiebt sich der resultierende Strom *3*, den Schallenberger in der Weise ausnutzen wollte, wie es die Fig. 93 zeigt.

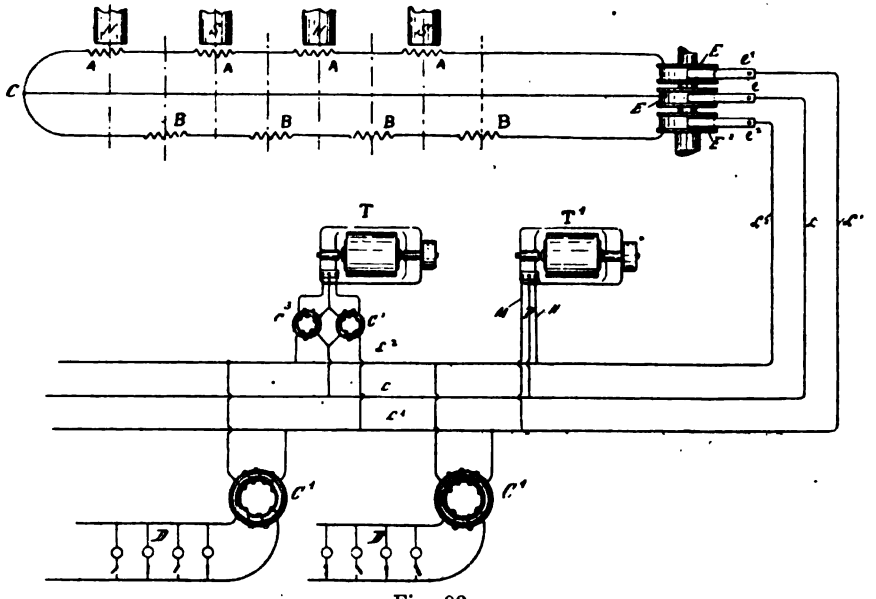


Fig. 93.

Die Drähte in der Armatur sind so angeordnet, dafs der Strom in *AA* das Maximum erreicht, wenn *BB* im Minimum der magnetischen Induktion stehen und vice versa, wie aus der Fig. 91 ersehen werden kann. Schallenberger erzeugt demnach (Fig. 93) zwei in der Phase verschobene Wechselströme und benutzt in einer dritten (der mittleren) Leitung den aus beiden resultierenden Strom und hat dadurch eine in der Mehrphasen-Stromtechnik bemerkenswerte Etappe geschaffen, die eine Aufzählung bei der Entwickelung dieses Stromsystems verdient.

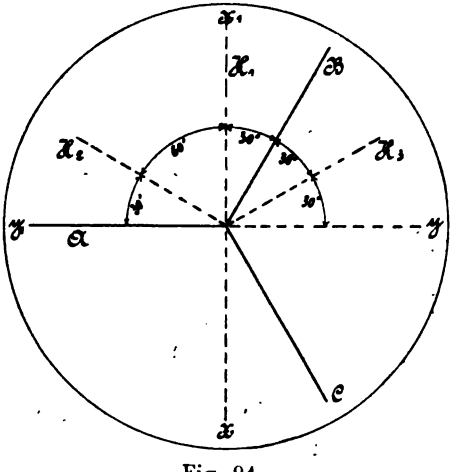


Fig. 94.

Suchen wir jetzt den Wert der Intensität des Feldes H festzustellen, wenn dreiphasige, um 120° verschobene Wechselströme verwendet werden.

Es bedeuten in der Fig. 94 (Seite 131) die Linien A, B und C die Werte der dreiphasigen Ströme in den zugehörigen drei Leitern zu bestimmter Zeit, wobei dieselben von der Peripherie zum Mittelpunkte gerichtet sind.

Wir können nun für die Stärken der von den drei Strömen erzeugten Felder schreiben

$$H_1 = H \cdot \sin \omega t$$

$$H_2 = H \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$H_3 = H \cdot \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right).$$

Fällen wir auf I, II, III Senkrechte, so dafs H_1 mit der x-Achse zusammenfällt, so erhalten wir

$$H_1 = H \cdot \sin \omega t$$

$$-H_2 \cos 60^\circ = -H \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos 60^\circ$$

$$-H_3 \cos 60^\circ = -H \cdot \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \cos 60^\circ,$$

und daraus wird

$$\Sigma_x = H \cdot \sin \omega t - H \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos 60^\circ - H \cdot \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \cos 60^\circ$$

$$= H \left(\sin \omega t - \cos 60^\circ \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)\right]\right.$$

Da nun

$$\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = -\sin \omega t$$

und

$$\cos 60^\circ = \frac{1}{2},$$

wird

$$\Sigma_x = H \left(\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin \omega t\right) = \frac{3}{2} H \sin \omega t.$$

Beziehen wir dieselben Werte auf die Y-Achse, so ändern sich dieselben in

$$H_1 = 0$$

$$H_2 \cos 30^0 = H \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos 30^0$$

$$- H_3 \cos 30^0 = - H \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \cos 30^0,$$

$$\Sigma_y = H \cos 30^0 \left[\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)\right].$$

Nun ist aber

$$\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = \sqrt{3} \cos \omega t$$

und

$$\cos 30^0 = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

also

$$\Sigma_y = H \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{3} \cos \omega t = \frac{3}{2} H \cos \omega t;$$

die Resultante der Summe dieser beiden Projektionen wird also gleich sein

$$H_R = \sqrt{\Sigma_x^2 + \Sigma_y^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{3}{2} H \sin \omega t\right)^2 + \left(\frac{3}{2} H \cos \omega t\right)^2}$$

$$= \frac{3}{2} H.$$

Diese dreiphasigen Ströme haben aber noch die Eigenschaft, dafs nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetze ihre algebraische Summe stets Null bleibt; doch zeigt uns eine kurze Überlegung

$$J_1 = J_0 \sin \omega t$$

$$J_2 = J_0 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$J_3 = J_0 \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$\Sigma J = J_1 + J_2 + J_3 = J_0 \left[\left(\sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)\right].$$

Da nun

$$\sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = 0,$$

so ist auch

$$\Sigma J = 0.$$

Übrigens kommt man aus der Betrachtung des Diagramms Fig. 95 ebenfalls zur Überzeugung, dafs die algebraische Summe

der drei Ströme stets Null sein müsse und daſs man infolgedessen die bei anderen Leitungen für in der Phase verschobene Wechselströme nötige Rückleitung ersparen kann.

Mittels eines sehr einfachen Apparates kann man den letzten Satz auch für eine vollständige Periode graphisch veranschaulichen.

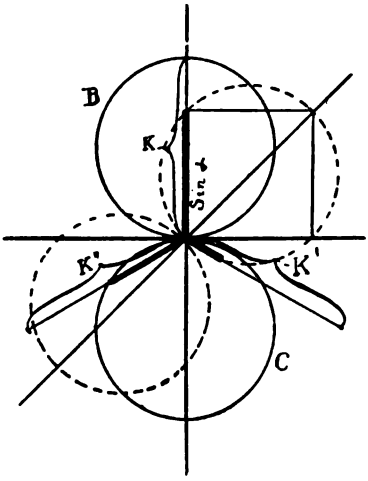


Fig. 95.

Aus starkem Papier werden zwei kreisrunde Scheiben ausgeschnitten, von denen die eine zwei Kreise trägt, deren Peripherieen sich im Mittelpunkte des Hauptkreises (Fig. 96) berühren und deren eingeschlossene Flächen roth bezw. grün angelegt sind.

Der andere Kreis erhält drei um 120° zu einander verstellte offene Schlitze, die sich im Mittelpunkte des Kreises treffen. Man befestigt nun die Scheibe II auf Scheibe I, so daſs sie sich vollständig decken und daher die Mittelpunkte aufeinander fallen, fixiert die Scheibe I und richtet die Scheibe II so ein, daſs sie um den Mittelpunkt verschoben werden kann.

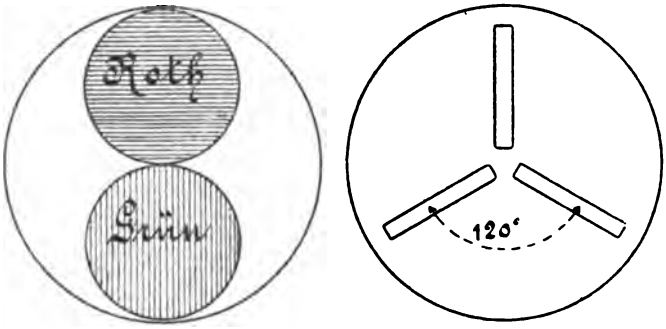


Fig. 96.

Die drei Schlitze stellen die drei Induktionsspulen dar, aus welchen die drei Wechselströme in die Leitung entsendet werden, und die farbigen Streifen, welche unter den Schlitzen erscheinen, bedeuten die momentanen Intensitäten der Ströme.

Messen wir die jeweiligen Längen dieser Streifen und addieren wir die Längen der gleichfarbigen, so finden wir, dafs diese Summe immer und in jeder Lage der Länge des dritten Streifens vollkommen gleich ist.

Betrachten wir die unterste Kurve in Fig. 87, Seite 127, zu einer bestimmten Zeit, z. B. im Momente t.

I und II haben die gleiche Intensität und zwar $J \sin 30^0 = \frac{1}{2}$, also $J = \mathrm{I} + \mathrm{II}$.

Zur selben Zeit t hat aber Strom III die volle Intensität $-J$ und wir erhalten daher

$$\mathrm{I} + \mathrm{II} + \mathrm{III} = J - J = 0.$$

Zum gleichen Summenwerte mufs man bei gleichen Untersuchungen in jedem anderen Punkte des Drehungsweges kommen.

A. du Bois-Reymond berichtet in seinem Vortrage am 28. April 1891 auch über Experimente mit Drehfeldern, welche bei Siemens & Halske angestellt worden sind und die heute noch Anspruch auf Interesse erheben können.

Ein vollkommen und ununterbrochen bewickelter Eisenring wurde in drei, vier und sechs gleiche Teile zerlegt. Jeder Teil wurde mit völlig konstantem Gleichstrome erregt und es wurden die Stromstärken für jede Messung so gewählt, dafs sie der betreffenden Phase der drei, vier oder sechs Wechselströme entsprach, in welcher das Drehfeld untersucht werden sollte. Auf diese Weise wurde für jede Phase der Drehung das resultierende Feld ruhend dargestellt und man konnte mit voller Mufse seine Gestalt durch Eisenfeilspäne, seine Richtung und Stärke durch beliebig genaue Messungen untersuchen. Dabei ergab sich folgender wichtige Satz: Je mehr Spulen, desto schärfer ist das Bild.

Die Intensität des Drehfeldes wurde gemessen, indem eine Spule in der Mitte des Ringes so aufgehängt wurde, dafs sie durch eine Torsionsfeder in einer normalen Lage gehalten wurde. Bei Erregung des Drehfeldes mit einem konstanten Strome wurde die Spule abgelenkt und durch die Torsionsfeder in die Normale zurückgeführt.

Der Torsionswinkel war das Maafs für die Intensität des Drehfeldes.

Die nachstehende Tabelle enthält die interessanten Ergebnisse dieser Messungen. Aus diesen Experimenten ist zu entnehmen, dafs die Pulsationen der Drehungsgeschwindigkeiten gröfser sind,

Dreispuliger Motor				Sechsspuliger Motor								Vierspuliger Motor	
Gemessene Richtung des Nordpols in Graden	Gemessene Richtung des Südpols in Graden	Richtung der Halbierungslinie, in welcher die Intensitäten gemessen wurden in Graden	Gemessene Intensität	Gemessene Richtung der Achse in Graden	Gemessene Intensität	Strom in Ampère in Spule I	Strom in Ampère in Spule II	Strom in Ampère in Spule III	Richtung der Achse in Graden nach dem Parallelogramm der Kräfte konstruiert	Strom in Ampère in Spule I	Strom in Ampère in Spule II	Gemessene Richtung der Achse in Graden	Gemessene Intensität
— 3	177	— 3	120	3	133	0,0	+ 8,7	— 8,7	0	0,0	10,0	3	118
38	179	19	112	20	136	+ 1,7	+ 7,7	— 9,4	10	1,7	9,8	31	123
45	182	24	115	27	136	+ 3,4	+ 6,4	— 9,8	20	3,4	9,4	37	124
55	187	31	117	33	137	+ 5,0	+ 5,0	—10,0	30	5,0	8,7	43	131
60	186	33	118	38	135	+ 6,4	+ 3,4	— 9,8	40	6,4	7,7	47	133
60	197	38	115	45	135	+ 7,7	+ 1,7	— 9,4	50	7,7	6,4	48	133
61	240	60	120	63	137	+ 8,7	0,0	— 8,7	60	8,7	5,0	53	132
60	282	81	115	78	137	+ 9,4	— 1,7	— 7,7	70	9,4	3,4	57	129
70	290	90	116	85	136	+ 9,8	— 3,4	— 6,4	80	9,8	1,7	63	125
70	294	92	119	92	140	+10,0	— 5,0	— 5,0	90	10,0	0,0	93	124
70	295	92	117	97	136	+ 9,8	— 6,4	— 3,4	100				
79	297	98	115	103	136	+ 9,4	— 7,7	— 1,7	110				
120	300	120	120	123	138	+ 8,7	— 8,7	— 0,0	120				

als die Pulsationen der Feldstärken. Beim dreispuligen Motor hatten die beiden Pole verschiedene Geschwindigkeiten, was aber wohl auf eine Unregelmäfsigkeit in der Anordnung zurückzuführen sein dürfte.

Wenn wir die weitere Entwickelung des Drehstromes überblicken, so finden wir, dafs dieselbe mit der Frage der elektrischen Kraftübertragung eng verbunden ist.

Die Versuche, welche Marcel Deprez bezüglich der Fernleitung elektrischer Energie in München und Paris einleitete und mit so geringem absoluten Erfolge durchführte, wurden trotzdem allseitig mit grofser Freude begrüfst, denn sie zeitigten allgemein die Überzeugung, dafs Deprez Anregung zu einer technischen Sonderdisziplin gab, von der wir viel zu erwarten berechtigt sind.

Vor allem mufsten aber damals im Dynamo-Maschinenbau Verbesserungen angestrebt werden, die schliefslich auch durch die sogenannte englische Schule der Elektrotechniker (Kapp, Crompton u. s. f.) erreicht wurden; auch die Fabrik „Oerlikon“ hat sich dabei grofse Verdienste erworben.

Der Gleichstrom erschien aber zur Kraftübertragung auf weite Entfernung von jeher nicht wohl geeignet, denn erstens ist der Kollektor bei Hochspannungs-Maschinen immerhin ein stets gefährliches Maschinenelement und dann ist es auch äufserst schwierig, Gleichstrom-Maschinen für hohe Spannungen zu bauen.

Man war also zur Kraftfernleitung auf den einfachen Wechselstrom angewiesen, bei welchem aber wieder die Konstruktion brauchbarer Motoren schier unübersteigbare Schwierigkeiten bot.

Nun folgten die Entdeckungen von Ferraris, Bradley, Tesla, Haselwander, Schallenberger u. s. f. bezüglich der zweiphasigen Wechselströme, welche fast alle im Jahre 1888 veröffentlicht wurden, ohne dafs eine praktische Verwertung dieser Erfindungen verzeichnet werden konnte. Auch selbst der Tesla-Motor, welcher eine Zeit lang am meisten Aufsehen erregt hatte, erfüllte zunächst die auf ihn gesetzten Hoffnungen nicht, und erst nachdem durch die Kraftübertragung Lauffen-Frankfurt a. M. der Beweis von der Möglichkeit, Drehstrom-Motoren mit gutem Nutzeffekt zu bauen und zu betreiben geliefert war, ist derselbe neuerdings in Amerika praktisch verwertet worden. Die Anordnung dreiphasiger Wechselströme, welche fast gleichzeitig von Bradley, Dobrowolsky, Haselwander und Wenström angewendet worden ist, bot

endlich eine aussichtsreiche und vielversprechende Kombination und wurde schliefslich zu bedeutender Vollkommenheit ausgebildet.

Als Bradley im Oktober 1888 sein amerikanisches Patent auf Abzweigung von drei Leitungen von einem Gramme-Anker anmeldete, arbeitete Dobrowolsky bei der A. E.-G. ebenfalls an einem Motor mit dreiphasigem Strome; desgleichen Haselwander in Offenburg. Im März 1889 wurde von der A. E.-G. ein Patent auf diesen Gegenstand angemeldet, jedoch infolge einiger Formalitätsfehler zunächst nur teilweise erteilt. Da die Vorkehrungen zum Bau solcher Motoren die Gesellschaft stark in Anspruch nahmen und einige Detailverbesserungen die Zeit vollständig absorbierten, so verspätete sich die umgestaltete zweite Anmeldung bis zum August; während dieser Pause, und zwar im Juni, reichte Haselwander seine diesbezügliche Patentanmeldung ein. Obwohl nun das Dreiphasen-Stromsystem, wie es jetzt von der A. E.-G. angewendet wird, sich wesentlich von dem ursprünglich in Aussicht genommenen unterscheidet, so sind doch diese Episoden aus dem Entwickelungsgange interessant genug, um deren Erörterung hier zu rechtfertigen. In demselben historischen Interesse mufs man hinzufügen, dafs die erste Publikation von Bradley erst gegen Ende Sommer 1889 erschien, während schon im Beginne des Sommers 1889 ein kleiner Dreiphasen-Motor und eine sechspferdige Drehstrom-Dynamo in der Fabrik Ackerstrafse der A. E.-G. bekannten und hervorragenden Elektrikern vorgeführt worden waren. Im Frühjahre 1890 wurden einige ausländische Drehstrom-Patente der A. E.-G. gedruckt, während die im Juni 1889 eingereichte Haselwandersche Patentanmeldung erst im Sommer 1890 durch Auslegung öffentlich bekannt wurde. Die von Wenström 1890 eingereichten und auf denselben Gegenstand bezüglichen Patente kommen bei der Prioritätsfrage kaum in Betracht. Es ist schwer, bei einer solchen sozusagen in der Luft schwebenden Erfindung aus dem Schwalle der plötzlich auftauchenden Publikationen und Patentanmeldungen dem einen oder dem anderen die Priorität des Gedankens zuzusprechen, zumal da, wie wir gesehen haben, diese Erfindungen in der That so rasch nacheinander auftauchten, dafs die Selbständigkeit und Unabhängigkeit jedes einzelnen Konstrukteurs nicht in Frage gestellt werden kann. Unstreitig bleibt aber die technische Priorität derjenigen Person resp. Firma, welche eine

Erfindung lebensfähig gemacht und zuerst aus einem Gedanken resp. Versuche ein brauchbares technisches Objekt erzielt hat. Wenn auch dem Prof. Ferraris und Tesla der wissenschaftliche Wert ihrer Entdeckungen nicht geschmälert werden soll, so gebührt doch das Verdienst der praktischen Ausarbeitung und Durchführung des Drehstrom-Systems der A. E.-G. Diese war es, die das gesamte System zu einer solchen Vollkommenheit brachte, dafs die kühnsten Unternehmungen, wie die Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt, ermöglicht wurden.

Es soll nun eingehend beschrieben werden, wie bei der A. E.-G. in Berlin das Dreiphasen-Drehstrom-Prinzip ausgebildet und schon im Jahre 1890 ein System der Erzeugung, Regelung und Fernleitung für Wechselströme mit verschiedener Phase aufgestellt worden ist:

Die Stromerzeuger liefern beliebig viele Ströme von aufeinander folgenden Phasen; vor dem Eintritte in die Leitung werden sie vereinigt zu nur drei Strömen von 120° Phasenunterschied, welche durch eine geringe Zahl von Leitungen in die Ferne gesandt und sodann an den Verbrauchsstellen abermals in mehrere Ströme von verschiedener Phase gespalten werden.

Dieses System bietet den Vorteil, dafs die Stromerzeuger, was die Zahl der Ströme verschiedener Phase anbelangt, beliebig

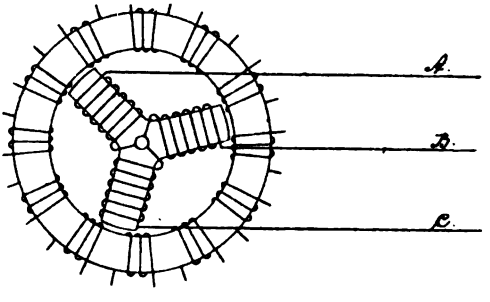


Fig. 97.

gebaut sein können; man giebt dem Anker so viele Unterabteilungen, wie es für den ruhigen, erschütterungsfreien Gang und für die günstigste Ausnutzung der Maschine erforderlich scheint, wobei man auch von der Gröfse der betreffenden Maschine abhängig ist. Diese einzelnen Ströme werden einzeln gemessen, geregelt (z. B. durch Induktionswiderstände) und nach Bedarf

bei etwaiger Überlastung einzeln aus anderen Stromerzeugern unterstützt u. s. w.

Nachdem die einzelnen Ströme für die Fernleitung gewissermaafsen fertig sind, werden sie noch in geeignete Induktionsapparate (Fig. 97) geleitet; durch die Wirkung der gegeneinander verschobenen Ströme entsteht in den Induktorien ein kreisendes magnetisches Feld, das in ihren sekundären Windungen drei Ströme von 120° Phasenabstand induziert. Diese drei Ströme können so zusammengeschaltet werden, wie Fig. 98 oder Fig. 99

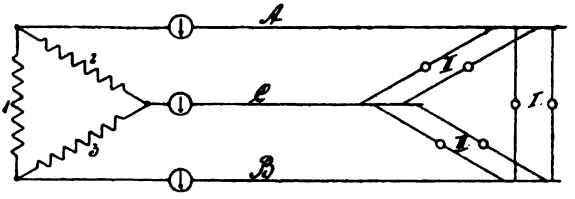


Fig. 98.

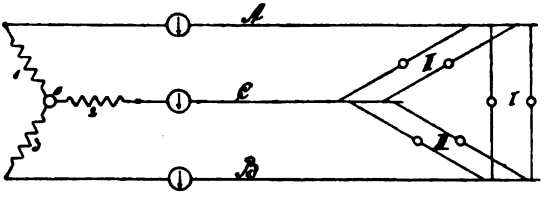


Fig. 99.

andeuten, so dafs nur drei Leitungen zur Stromabnahme genügen. Eine andere Schaltung ist in Fig. 100 dargestellt. Die Ströme i_1 i_2 i_3

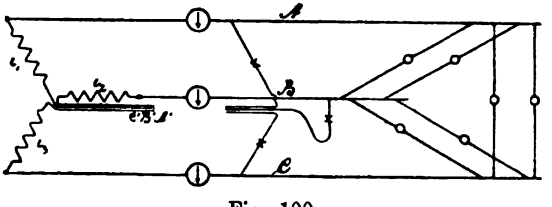


Fig. 100.

erhalten Rückleitungen A' B' C, welche zu einer einzigen vereinigt werden. Da die Ströme in der gemeinschaftlichen Leitung sich nahezu aufheben, so kann diese einen bedeutend geringeren Querschnitt erhalten als die drei Hauptleitungen.

Wir bemerken hierbei, dafs es auf die besondere Anordnung des Stromwandlers nicht ankommt. So kann man aufser der in Fig. 97 gekennzeichneten Anordnung auch diejenigen der Fig. 101

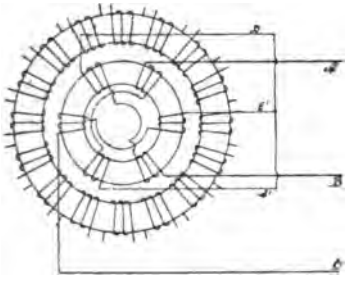


Fig. 101.

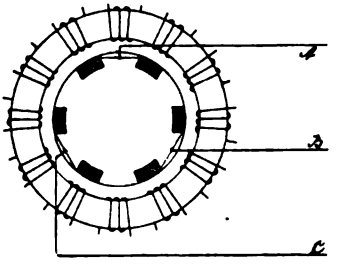


Fig. 102.

oder Fig. 102 anwenden, oder auch die ausgebreitete Form der Fig. 103 oder einzelne Stromwandler, wie in Fig. 104.

Erforderlich ist für vorliegendes System nur die durch den Induktionsapparat zu bewirkende Vereinigung mehrerer Ströme

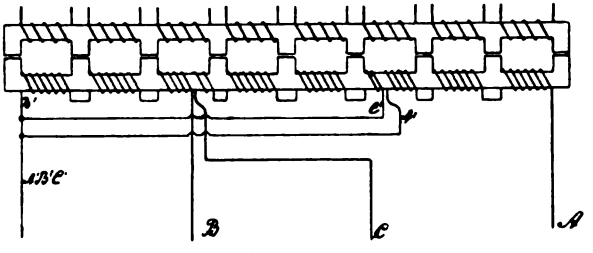


Fig. 103.

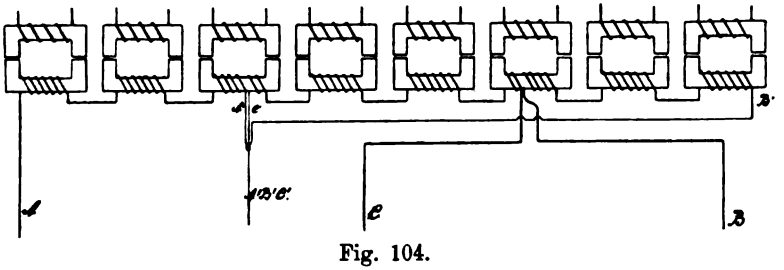


Fig. 104.

zu nur dreien, welche durch passende Schaltung (Fig. 98, 99 und 100) miteinander verkettet werden, so dafs sie durch eine geringe Anzahl Drähte fortgeleitet werden können. Ebensowenig wie

die Form der Umwandler berührt das Wesen des Systems, ob man bei Gelegenheit der beschriebenen Stromwandlung die Spannungsverhältnisse ändert (ob man z. B. aufser der Vereinigung der Ströme sie durch Wickelungsanordnung in hochgespannte verwandelt) oder nicht.

Man könnte nun einwenden, dafs durch Vereinigung vieler Ströme zu nur dreien man die Vorteile der Erzeugung von mehr Strömen wieder verliert. Dem ist indessen durchaus nicht so. Zwar ist es Thatsache, dafs, wenn wir die primären Windungen des Umwandlers mit mehreren Strömen speisen, die sekundären Windungen dagegen zu einer geringeren Zahl von Stromkreisen ausbilden, dafs daraus eine geringere Ausnutzung der sekundären Windungen sich ergiebt. Allein, da bekanntlich die Wechselstrom-Wandler einen viel günstigeren Wirkungsgrad erreichen als die Maschinen und billiger sind als letztere, so spielt hier eine Vergröfserung der Abmessungen der Umwandler um einen gewissen Bruchteil keine so grofse Rolle als bei den Stromerzeugungs-Maschinen.

Ferner haben wir bei den verketteten Strömen nur schwer einen Überblick über die augenblickliche Leistung einzelner Stromkreise. Wäre z. B. die Maschine selbst nach dem Schema der Fig. 98 oder Fig. 99 oder sogar der Fig. 100 geschaltet und jede der Leitungen mit einem Strommesser versehen, so würden alle drei Stromzeiger ausschlagen, auch wenn die Lampen in einem der Stromkreise, etwa in I, ausgeschaltet wären. Bei unregelmäfsig verteilter Belastung braucht man sehr viel Zeit, um sich über die Belastungsverteilung Klarheit zu verschaffen, auch ist eine vorsichtige Regelung der Spannung eines Stromkreises, ohne die anderen in Mitleidenschaft zu ziehen, sehr zeitraubend, praktisch in Elektrizitätswerken also kaum ausführbar.

Die Fig. 1 (Tafel V), welche wir sofort ausführlicher besprechen wollen, zeigt links einen vielphasigen Stromerzeuger D schematisch: jeder der Ströme wird einzeln durch die Regelungs- bezw. Ausschalteinduktoren R_1 R_2 R_3, ferner durch die Strommesser A_1 A_2 A_3 durchgeleitet. Diese Ströme werden alle in den Umwandler T eingeleitet. Anstatt die Rückleitungen 1′, 2′, 3′, 4′, 5′ und 6′ einzeln zu führen, könnte man natürlich auch eine gemeinschaftliche, genügend starke Rückleitung verwenden, wie das in der Elektrotechnik ja häufig der Fall ist; selbstverständ-

lich wird dadurch, da eine Verkettung nicht bewirkt wird, die Unabhängigkeit der einzelnen Ströme nicht gestört, denn jeder Strom bleibt für sich abstellbar, meſsbar und regelbar, ohne die anderen in Mitleidenschaft zu ziehen. Dieselbe Fig. 1 (Tafel V) zeigt auch ferner, daſs die induzierten Ströme zu nur drei verketteten Strömen nach dem Schema der Fig. 98 zusammengeschaltet sind und durch Leitungen I, II, III in die Ferne geleitet werden.

Da nun aus denselben Gründen wie bei Stromerzeugern auch bei Kraftmaschinen möglichst viele einzelne Stromphasen erwünscht sind, so werden die drei verketteten Ströme an den Verbrauchsstellen (unter Umständen in sogen. Unterstationen) durch ähnliche Stromwandler (s. Fig. 1, Tafel V) abermals in mehrere einzelne Ströme zerteilt. Die Anzahl dieser „tertiären“ Ströme braucht natürlich nicht dieselbe zu sein wie diejenige der primären Ströme, sondern kann gröſser oder kleiner sein. Bei Antrieb groſser Kraftmaschinen wird man z. B. möglichst viele Ströme nehmen, weil es sich in diesem Falle besonders um höchste Ausnutzung und ruhigen Gang (ohne Erschütterungen) handelt; hingegen können kleine Motoren schon mit zwei, drei, vier, fünf Stromphasen genügend gut arbeiten. Der zu der Verbrauchsstelle führende Stromstrang braucht somit nicht in allen seinen Strömen gleichmäſsig benutzt zu werden: gröſsere Maschinen, wie M_1 (Fig. 1, Tafel V, rechts), werden an alle Phasen, kleinere, wie M_2, nur an einige derselben angeschlossen. Die Glühlampen L werden selbstverständlich meist nur von einzelnen Leiterpaaren gespeist, z. B. von den Leitungen ik und ef (Fig. 1, Tafel V).

In derselben Figur ist bei T_2 auch ein Umwandler gezeigt, welcher den verketteten Dreiphasen-Strom in zwei Ströme mit 90° Phasenunterschied verwandelt. Diese Ströme besitzen zwar eine gemeinsame Rückleitung $l_2\, l_4$, sind jedoch, wie oben erklärt, gleichwohl als ganz unabhängig zu betrachten; sie speisen vorerst einen kleinen Zweiphasen-Motor M_3, einer derselben auſserdem noch die Lampen L. Ist eine Verbrauchsstelle nur für Beleuchtung bestimmt, so können die Lampen direkt oder durch Vermittelung eines gewöhnlichen einfachen Stromwandlers T_3 an zwei beliebige Hauptleitungen I, II, III angeschlossen werden.

Falls durch zu starke Stromentnahme, die nicht gleichmäſsig sich auf das ganze Netz verteilt, an der Erzeugungsstelle einzelne Stromkreise überlastet werden, kann man, um die Spannung

immer noch auf der richtigen Höhe zu halten, gewöhnliche Wechselstrom-Maschinen zu Hilfe nehmen und parallel zu den überlasteten Spulen des Erzeugers schalten. In Schema 1 (Tafel V) sind z. B. zwei gewöhnliche Wechselstrom-Maschinen W_1 und W_2 zur Entlastung der Stromläufe 1 und 2 eingeschaltet.

Ist der Verbrauch durchweg für den Stromerzeuger zu grofs, so können zu diesem auch Mehrphasen-Maschinen parallel geschaltet werden. Dies kann auf zweierlei Weise geschehen. Fig. 3 (Tafel V) zeigt die Parallelschaltung in der Weise, dafs die entsprechenden Ströme beider Maschinen sich vor der Umwandlung vereinigen. Hingegen ist in Fig. 2 (Tafel V) die Parallelschaltung nach der Umwandlung abgebildet. Letzteres Verfahren ist im allgemeinen deswegen vorzuziehen, weil die Stromerzeuger nicht für gleiche Phasenzahlen gebaut zu sein brauchen; in der That sind nach der erwähnten Fig. 2 (Tafel V) zwei Maschinen, welche verschiedene Zahlen von Strömen liefern, parallel geschaltet.

Die Gewinnung der bei dem vorliegenden Systeme der Erzeugung, Regelung und Fernleitung erforderlichen unabhängigen Wechselströme verschiedener Phase kann zuweilen auch in der Erzeugerstation in bekannter Weise aus mehreren synchron laufenden Wechselstrom-Maschinen erfolgen. Dieser Aufbau der Erzeugermaschinen wird namentlich in dem besonderen Falle benutzt werden, wo die Anzahl der Fernleitungen gleich derjenigen der Phasen an der Erzeugerstelle ist, und wo man statt mehrphasiger Stromerzeuger einfache Wechselstrom-Maschinen und für jede der Phasen mindestens eine solche zur Verfügung hat. In diesen Fällen wird die Regelung zweckmäfsig durch verschieden starke Erregung der zu der betreffenden Phase gehörigen Erzeugermaschine bewirkt. Aber auch hierbei werden die einzelnen aus den synchron laufenden Maschinen gewonnenen Ströme nicht verkettet erzeugt, sondern, wie vorher beschrieben, unabhängig und werden als solche erst nachträglich (hinter den Mefsapparaten) zu den Induktionsapparaten geleitet und in diesen verkettet, weil nur hierdurch die Möglichkeit einer leichten Übersicht über die Belastungsverhältnisse und eine leichte Regelbarkeit der einzelnen Ströme unabhängig, d. h. ohne gegenseitige Beeinflussung, geschaffen wird.

Es wurde damals von der A. E.-G. folgender Patentanspruch (79 528) erhoben:

„System der Erzeugung, Regelung und Fernleitung bei Wechselströmen mit verschiedener Phase, dadurch gekennzeichnet, dafs mehrere (viele) Wechselströme von aufeinander folgender Phase unabhängig und getrennt von einander in dem oder den Stromerzeugern erzeugt, einzeln durch Ausschalter, Mefs- und Regelungsvorrichtungen geleitet und in besonderen Induktionsapparaten zu nur drei in bekannter Weise miteinander verketteten Strömen mit je 120° Phasenabstand vereinigt werden, worauf dieselben durch nur drei Leitungen zu den Verbrauchsstellen gelangen und dort erforderlichenfalls durch ähnliche Induktionsapparate abermals und je nach dem Zwecke in mehrere Ströme von verschiedener Phase umgewandelt werden, um entweder einzeln oder gruppenweise oder in ihrer Gesamtheit Verwendung zu finden."

Dobrowolsky schrieb im Jahre 1891 über seine Erfindung ungefähr folgendes:

Bekanntlich besteht der Motor von Tesla aus einem Magnetkranze, welcher zwei Sätze von Spulen trägt. Diese beiden Spulengruppen werden von zwei Wechselströmen gespeist, welche in ihrer Phase um 90° voneinander entfernt sind, so dafs z. B. Spulen II stromlos sind, wenn sich Spulen I im positiven Maximum befinden, und dafs in dem Maafse, wie in I der Strom sinkt, er in II steigt, bis er hier in II sein positives Maximum zu einer Zeit erreicht, wo der Strom in I gleich 0 ist. Wie Fig. 46 Seite 82 schematisch zeigt, entsteht dabei im Innern des Magnetsystems ein rotierendes magnetisches Feld (sogenanntes Ferrarissches oder „Dreh"feld). Dabei verhält sich der innere, umschlossene Raum ungefähr so, als wenn das Magnetfeld konstant wäre und mechanisch gedreht würde. Nun widersteht aber ein Anker, dessen Windungen in sich kurz geschlossen sind (oder auch ein unzerteiltes Stück Eisen) der Drehung in einem magnetischen Felde, weil bei einer Bewegung in ihm Ströme induziert werden, welche dieser Bewegung entgegenwirken. Dieselben Ströme werden diesen Anker nun veranlassen, wenn er in ein Drehfeld (wie Fig. 46) gebracht wird, der Bewegung dieses Feldes zu folgen, so lange er noch nicht synchron mit dem Felde läuft. Nach diesem Prinzipe lassen sich höchst einfache Elektromotoren, ohne jeden Schleifkontakt und ohne Bürsten, bauen. In der That versprach man sich seinerzeit sehr viel von den Tesla-Motoren;

dafs jedoch diese Motoren sich nicht besonders gut bewähren können, wurde in Vorstehendem schon gezeigt.

Die totale Anzahl Ampèrewindungen, welche den Tesla-Motor erregen, schwankt um 40% ihres Mindestwertes und das Feld des Tesla-Motors ist nicht nur ein rotierendes, sondern auch ein stark pulsierendes. Die Wirkungsweise des laufenden Motors ist demnach bei weitem nicht so einfach, wie anfangs angenommen wurde. Wir können jedoch beide Wirkungen, die Drehung und die Pulsation des Feldes gesondert betrachten, und zwar an der Hand des Wechselstrom-Motors von Elihu Thomson. Dieser Motor besteht aus einem von einem Wechselstrome gespeisten Magnetfelde und einem in sich geschlossenen Anker, und er mufs, wie alle synchronen Wechselstrom-Motoren, durch besondere Vorkehrungen erst auf die richtige Tourenzahl gebracht werden, ehe der Wechselstrom seinen Betrieb übernimmt. Bei Überlastungen bleibt er plötzlich stehen, denn die Pulsationen des Feldes wirken nur bei einer gewissen Geschwindigkeit treibend, bei einer geringeren sind sie direkt hemmend und bremsend, da die von ihnen induzierten Ströme in dem „Schlufsanker" nicht in der richtigen Zeit und Lage gegen das Feld auftreten — aus diesem Grunde läfst sich ein stillstehender Schlufsanker schwer in einem Wechselstrom-Felde drehen. Ein Tesla-Motor nun oder überhaupt ein Zweiphasen-Motor hat, wie oben gesehen, ein Magnetfeld, welches um 40% in seiner Intensität pulsiert, er wird also die Eigenschaften des Thomson-Motors teilweise besitzen müssen; so lange der Schlufsanker bei Tesla nicht synchron mit dem Felde läuft, ist seine Zugkraft nur gleich der Differenz zwischen dem Antriebe seines rotierenden Feldes und der Bremsung seitens des pulsierenden Magnetismus. Der Tesla-Motor geht also mit Last schlecht an und hat bei voller Geschwindigkeit das Bestreben, synchron zu bleiben bis zu einer gewissen Belastungsgrenze, über welche hinaus seine Tourenzahl und Zugkraft rapid abnehmen. Das Gebrauchsgebiet dieses Motors ist somit ein relativ enges und er repräsentiert nur insofern eine Verbesserung des ganz synchronen Thomson-Motors, als er im stande ist, bei Stromschlufs mit mäfsiger Last von selbst anzugehen. Einen guten Motor, ohne die dem Synchronismus anhaftenden Fehler, kann man nach dem Prinzipe des Drehstromes nur dann erhalten, wenn man die Pulsationen des Magnetfeldes in ihrer Intensität ver-

mindert. Ein ideales Drehfeld sollte absolut konstant sein, es sollten nur seine Kraftlinien rotieren, gerade wie wenn ein mit Gleichstrom gespeister Electromagnet gedreht würde.

Man nähert sich diesem Ideal, wenn man die Anzahl der Ströme, deren Phasen aufeinander folgen, vermehrt; jedoch ist es keineswegs nötig, sehr viele Ströme zu nehmen. Ein Blick auf Fig. 104 zeigt uns, dafs schon bei drei Strömen die Summe

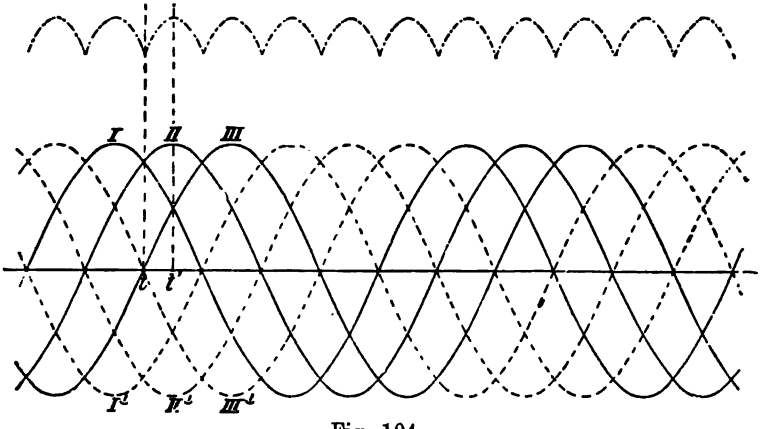


Fig. 104.

dieser Ströme ausreichend konstant wird. In der That ist zur Zeit t die Summe der absoluten Beträge der drei Ströme

$$2 \sin 60^0 \cdot i_{max} = 1{,}732\, i_{max}$$

und zur Zeit t'

$$2 \sin 30^0 \cdot i_{max} + i_{max},$$

d. h. $= 2\, i_{max}$. Die Pulsation des Feldes, welches dieser Schwankung der Summe der Ströme entspricht, ist also bei drei Strömen nur 15% gegen 40% bei Tesla. Arbeitet man mit relativ geringer Wechselzahl, so darf ohne Beeinträchtigung des Wirkungsgrades die Sättigung der Eisenmassen höher genommen werden und es wird bei nur 15% Schwankung der Ampèrewindungszahl die totale Menge des Magnetismus praktisch konstant bleiben.

Der praktischen Durchführung der Übertragung von drei um 60° in ihrer Phase gegeneinander verschobenen Strömen steht im allgemeinen die Steigerung der Anzahl der Leitungsdrähte hindernd im Wege. Wenn man, bestimmt durch die bessere Ausnützung der Dynamo (es wird später davon die Rede sein) und durch die Möglichkeit der Fernleitung, analog den zwei Strömen

entsprechenden drei Leitungen bei Tesla, vier Leitungen für drei Ströme annimmt, so wären diese vier Leitungen doch immerhin noch zu kostspielig. Eine einfache Umschaltung gestattet jedoch nun auch, drei Ströme durch drei Leitungen zu übertragen, und zwar mit noch weniger Material, als zwei Ferraris-Teslasche Ströme bei drei Leitungen beanspruchen würden. Es wird dies dadurch ermöglicht, dafs die Fernleitung statt mit drei Strömen von 60° Phasenabstand mit drei Strömen von 120° Phasenabstand geschieht; und es wird dies dadurch bewirkt, dafs die Verbindungen der Spulen des Stromerzeugers, welche den einen Strom (siehe Seite 127 Fig. 88) liefern, umgekehrt werden. Da jedem der Stromkreise im Motore mindestens zwei entgegengesetzt ge-

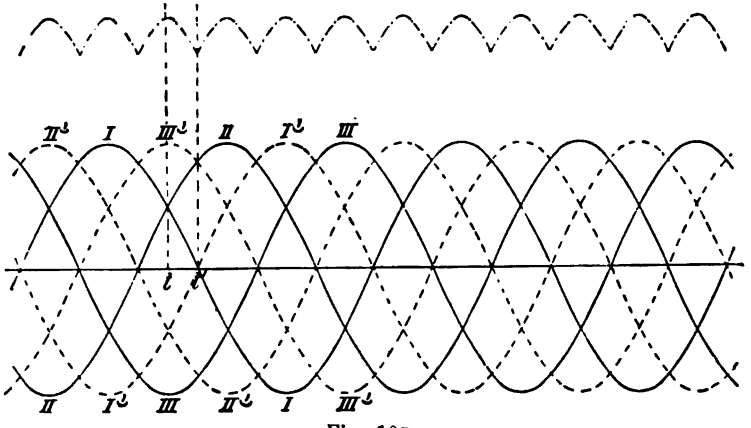


Fig. 105.

wickelte Spulen entsprechen, welche den Nord- resp. Südpol erzeugen, so können wir für ihre Wirkung, die Ströme abgesehen von ihrem Vorzeichen betrachten und zu einem jeden seinen entgegengesetzten addieren (siehe Fig. 105).

Es ergiebt diese Figur eine Wirkungsweise der drei Ströme von 120° Differenz, welche vollständig analog ist der auf Fig. 104 gezeichneten für Ströme von 60° Differenz.

Betrachten wir die Fig. 105 näher, so finden wir, dafs zur Zeit t die Summe der Ströme I und II $= 2 \sin 30^\circ \cdot i_{max}$, während Strom III $= i_{max}$ ist, und da $\sin 30^\circ = 0{,}5$, so ist I + II = III. Im Momente t dagegen ist I = 0, II = $\sin 60^\circ$, III = $\sin 120^\circ$, also abermals I + II = III. Es gilt dies überhaupt von Moment zu Moment, wie es leicht für sinusoidale Ströme nachweisbar ist.

Jeder der Ströme (oder Spannungen) ist gleich und entgegengesetzt der Summe der beiden anderen; ihre algebraische Summe ist stets $= 0$, während die Summe der absoluten Beträge, wie oben nachgewiesen, zwischen $2i$ und $1{,}732\,i$ schwankt. Aus der Thatsache, dafs die algebraische Summe der drei Ströme resp. Spannungen in jedem Augenblicke $= 0$ ist, folgt nach dem Kirchhoffschen Gesetze, dafs stets ein Strom hinter oder parallel mit der Summe der zwei anderen geschaltet werden kann. Dies ergiebt zweierlei Schaltungsarten, welche in Fig. 106 und Fig. 107

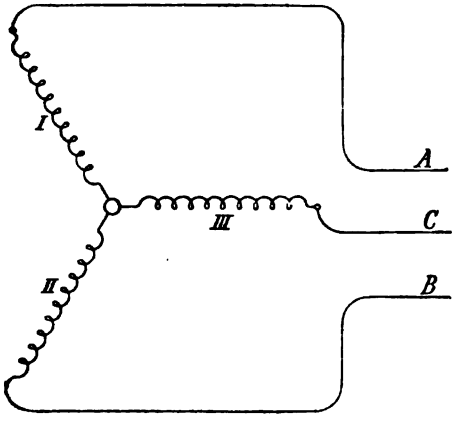


Fig. 106.

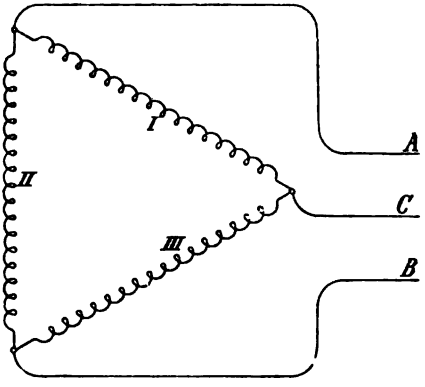


Fig. 107.

schematisch dargestellt sind. In Fig. 106 ist Strom I immer hintereinander mit den parallelen Strömen II und III, desgleichen II mit I und III und endlich III mit I und II geschaltet. Dagegen ist in Fig. 107 die Spannung von I = der Spannung von (II + III), II = (I + III) und III = (I + II) und demgemäfs darf Strom I mit den hintereinander geschalteten Strömen II und III parallel geschaltet werden etc. etc. Wir bezeichnen die erstere Schaltung als die „offene", die letztere als die „geschlossene" Verkettung der Ströme. Diese Verkettung ermöglicht die Fernleitung von drei Strömen durch drei Leitungen, indem der in der einen Leitung fliefsende Strom in den zwei anderen immer seine Rückleitung findet. Dieselben Schaltungsweisen können natürlich auch für mehr als drei Ströme verwendet werden. Die Verkettung der Ströme wurde zu gleicher Zeit und unabhängig voneinander von Bradley., Dobrowolsky, Wenström und Haselwander erfunden. Im Verlaufe der ausführlichen Versuche,

welche in der A. E.-G. angestellt wurden, und bei der näheren Ausarbeitung des Systems zeigten sich viele triftige Gründe, welche Dobrowolsky veranlafsten, von dieser einfachen Anordnung abzuweichen, dies waren namentlich die bei der geschlossenen Verkettung eventuell eintretende Minderleistung, also auch indirekt der geringere Wirkungsgrad — und Verteuerung der Dynamo-Maschinen und Motoren, die schwierige Regulierung und Messung der drei verketteten Stromkreise, die sehr erschwerte Kontrolle etc.

Dafs die verketteten Ströme sich nicht unwesentlich stören, erklärt sich wie folgt. Betrachten wir Fig. 108, so sehen wir, dafs der durch die Leitungen A und B fliefsende Strom aus der Summe der EMK von I und II resultiert; die Maxima dieser beiden Spannungen treten aber infolge der Zusammenschaltung nicht gleichzeitig auf, sondern in einem Abstande von 60°, und daher ist die Spannung von A bis B geringer, als die Summe der beiden Spannungen I und II; sie beträgt nur $2 \cdot \sin 60 \cdot e$, d. h. nur $1{,}732\,e$ statt $2e$. Die resultierende mittlere Spannung verhält sich also auch zur Summe der einzelnen mittleren Spannungen wie 1,732 : 2. Es mufs somit die Maschine im Verhältnisse 2 : 1,732 mehr Windungen erhalten, als wenn die Ströme einzeln addiert wären, vorausgesetzt, dafs man eine bestimmte Spannung in der Leitung haben will. Im Falle von nicht ganz rein sinusoidalen Strömen sind diese Verhältnisse noch mehr ausgeprägt und führen oft bedeutende Minderleistung der Maschine herbei. Dasselbe gilt auch von der Verkettung nach Schema Fig. 109. Obwohl I und (II und III) parallel geschaltet sind, liefern sie ungleichen Strom; bei gleicher Beanspruchung jedes Drahtes ist der Summenstrom nicht der doppelte, sondern nur das 1,732fache von jedem einzelnen. Die Schemata Fig. 106 und Fig. 107 gleichen überhaupt einander insofern, als alles, was bei der einen Schaltung für Spannung, bei der anderen für Strom gilt. Da jede der drei aus der Maschine führenden Leitungen sozusagen zwei benachbarten Stromkreisen dient, ist es auch schwer, aus der Messung von Strom und Spannung in der einen sich ein Bild zu machen von den Verhältnissen in den anderen; ein Nachregulieren der Spannung, z. B. bei ungleicher Belastung mit Hilfe von Induktionsspulen, die in den Stromkreis eingeschaltet sind, ist sehr schwer, ja beinahe unmöglich. Fig. 108 und Fig. 109

zeigen uns ein Bild einer Maschinenschaltung, welche auf drei verkettete Stromkreise arbeitet, und zwar ist hier der Fall dargestellt, dafs in einem drei Lampen, im anderen eine und im dritten gar keine Lampen brennen. Alle drei Ampèremeter zeigen aber doch Strom an, bei der Ungleichzeitigkeit der Stromimpulse

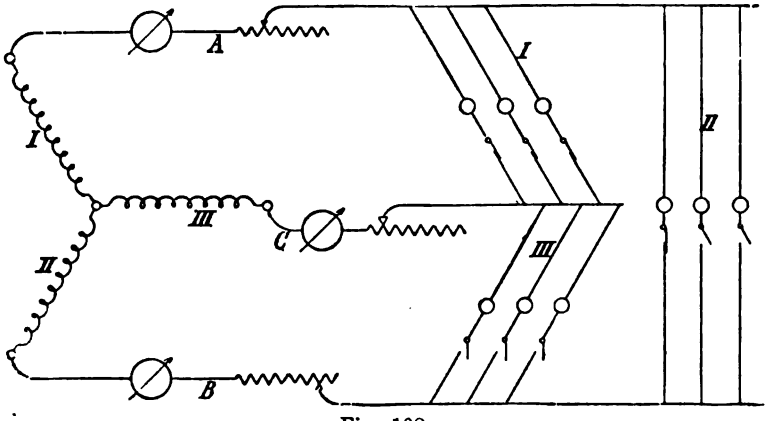


Fig. 108.

in jedem der drei Kreise ist ein rascher Überblick über die Belastungsverteilung von der Station aus unmöglich, die Nachregulierung wird oft verkehrt erfolgen, da man keine Zeit hat,

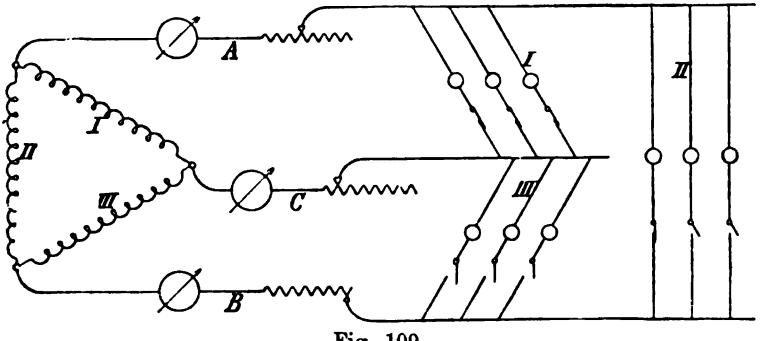


Fig. 109.

sich den komplizierten Stromverlauf zurechtzulegen. Jede Veränderung in einer Leitung hat Einflufs auf die anderen; schaltet man z. B. in *B* eine Induktionsrolle ein, so sinkt, da im Stromkreise III wegen geringerer Belastung die Spannung etwas gestiegen ist, gegen unsere Absicht auch die Spannung in II, und

bei jedem Versuche, diese zu korrigieren, ändern wir wieder die Spannungen der beiden anderen. Die Regulierung wird beinahe ein Ding der Unmöglichkeit. Bei ausschliefslichem Betriebe von Elektromotoren tritt freilich eine ungleiche Belastung nicht ein, allein es mufs eben auch die Belastung durch Lampen berücksichtigt werden.

Diese angeführten Gründe, Verschlechterung der Maschinen, primär sowohl wie sekundär, und die Schwierigkeiten bei der Regulierung und Messung waren es nun, welche Herrn v. Dobrowolsky veranlafst haben, den verketteten Drehstrom nicht in der besprochenen einfachen Weise zu gebrauchen, sondern das folgende System auszuarbeiten. Die Dynamomaschinen liefern mehrere ganz unabhängige Ströme, in der Regel sechs (jedoch ist die Zahl beliebig). Eine grofse Anzahl von Strömen gestattet eine gute Ausnutzung der Dynamomaschine, indem der ganze Umfang des Ankers mit aktiven Windungen bedeckt werden kann, was sich bei gewöhnlichen Wechselstrom-Maschinen bekanntlich nicht erreichen läfst. Die bessere Ausnutzung ist auch schon daraus ersichtlich, dafs eine Mehrphasen-Maschine (Drehstrom-Maschine) kontinuierlich elektrische Energie abgiebt, während die gewöhnliche Wechselstrom-Maschine dies nur pulsierend thut. Ebenso ist beim Drehstrom die in den Leitungen fliefsende Energie konstant, da, wie oben bewiesen wurde, die arithmetische Summe der einzelnen Ströme praktisch konstant ist, ganz analog dem Gleichstrom. Die von der Maschine gelieferten, einzelnen, unverketteten Ströme werden einzeln durch Ausschalter, Regulierinduktoren und Mefsinstrumente geführt und sodann durch geeignete Transformatoren zu drei verketteten Strömen von je 120° Phasenabstand vereinigt, um in die Ferne geleitet zu werden, wo sie je nach der Benutzung event. wieder gespalten werden. Die dabei verwendeten Transformatoren, welche der A. E.-G. patentiert sind, beruhen auf der durch den Drehstrom bewirkten Rotation eines magnetischen Feldes innerhalb geschlossener, polloser Eisenmassen, indem der von der Maschine kommende Stromkomplex in den sekundären Wickelungen ähnliche aufeinander folgende Stromimpulse erzeugt. Die Transformation entspricht dem Vorgange in einer Drehstrom-Dynamo, nur dafs das Feld um feststehende Spulen rotiert, während bei der Dynamo der Anker mechanisch im feststehenden Felde gedreht wird.

Da nun im Transformator drei verkettete Ströme von je 120° Phasenabstand erzeugt werden, so liegt der Gedanke nahe, dafs dieselben Verluste wieder auftreten könnten, wie bei direkter Verkettung der Ströme. Dem ist jedoch nicht so. Zwar wird infolge der Verkettung 15% an Spannung verloren und das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist nicht gleich dem Verhältnisse der Windungszahlen, aber es ist ja nur nötig, die Windungszahl der sekundären verketteten Ströme um 15% zu vergröfsern, um die primären Ströme voll auszunützen. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Transformators nur unerheblich beeinflufst. Überhaupt kommen der Transformationsverlust und die Kosten des Tranformators selbst kaum in Betracht, da man es in letzter Zeit überhaupt vorzieht, die Maschinen relativ niedrigvoltig zu bauen und die Energie erst kurz vor dem Eintritte des Stromes in die Leitung auf hohe Spannung hinaufzutransformieren. Eine Dynamo für 50 bis 100 Volt ist so viel billiger und aufserdem sicherer zu konstruieren, dafs ein Transformator sich dadurch bezahlt macht, und die niedrig gespannte Maschine arbeitet um so viel ökonomischer, dafs auch die 3 bis 4% Transformationsverlust ausgeglichen werden. Es ist wohl kaum nötig, darauf hinzuweisen, dafs dieses Verfahren bei sehr hochgespannten Strömen — etwa über 10000 Volt — überhaupt das einzig anwendbare ist.

Fig. 1 Tafel VI zeigt schematisch eine der vielen möglichen Anordnungen eines Drehstrom-Transformators, welcher die sechs einzelnen primären Ströme in drei verkettete umwandelt. Jedoch spiegeln sich die Vorgänge in den verketteten Stromkreisen der sekundären Wickelungen in den einzelnen primären Stromkreisen gesondert ab, so dafs die Regelung der Ströme und Spannungen eine ganz einfache und übersichtliche ist. Aufserdem geniefsen wir durch die Verkettung der sekundären Ströme den Vorteil, dafs die lange und somit teuere Fernleitung nur drei Leitungen anstatt vier nötig hat. Bei der zweiten Transformation an der Gebrauchsstelle empfiehlt es sich dann zum Betriebe gröfserer Motoren — ebenso wie für Beleuchtungszwecke — behufs besserer Ausnützung die verketteten Ströme wieder einzeln zu benutzen, und zwar aus den gleichen Gründen, welche bei den Dynamos vorlagen.

In der Folge werden wir nachweisen, dafs das Leitungs-

gewicht bei gleicher Energie für die drei Leitungen des Drehstromes nicht gröfser ist wie für die sonstigen zwei Leitungen.

F. A. Haselwander verwendete auch Wechselströme derart, wie man sie in den gebräuchlichen Gleichstrom-Maschinen mit mindestens zwei in Bezug auf Induktion verschiedenen Spulen in den Verbindungsdrähten der Spulen mit dem Stromsammler erzeugt, um durch den letzteren in Gleichstrom verwandelt zu werden. Er entnimmt einer Gramme-Maschine einfache Wechselströme, dann aber auch, ähnlich wie Tesla, zwei in der Phase um 90° versetzte Wechselströme, indem er einen Gramme-Ring mit vier Spulen verwendet, nur mit dem Unterschiede, dafs Tesla zwei gegenüberliegende, Haselwander dagegen zwei aufeinander folgende Spulen miteinander verbindet. Auch Haselwander verweist schon auf den Vorteil, bei dieser Schaltung Kondensatoren verwenden zu können; er gebraucht gern statt Dynamos mit geschlossener solche mit offener Ankerwickelung und er erläutert unter Benutzung einer Thomson-Houston-Dynamo als Stromerzeuger ein Dreileiter-Drehstrom-System, das in der Fig. 110 schematisch dargestellt ist.

Haselwanders korrigierter Patentanspruch lautete:

„Bei einer Fernleitung von Wechselströmen der Aufbau der Erzeugermaschinen aus mehr als zwei verschiedenen synchron laufenden Wechselstrom-Maschinen in Verbindung mit einer, der Zahl der Wechselstrom-Maschinen entprechenden Anzahl von Fernleitungsdrähten, die an verschiedenen Stellen eines als Anker dienenden, in sich geschlossenen Stromringes an der Verbrauchsstelle angeschlossen sind.“

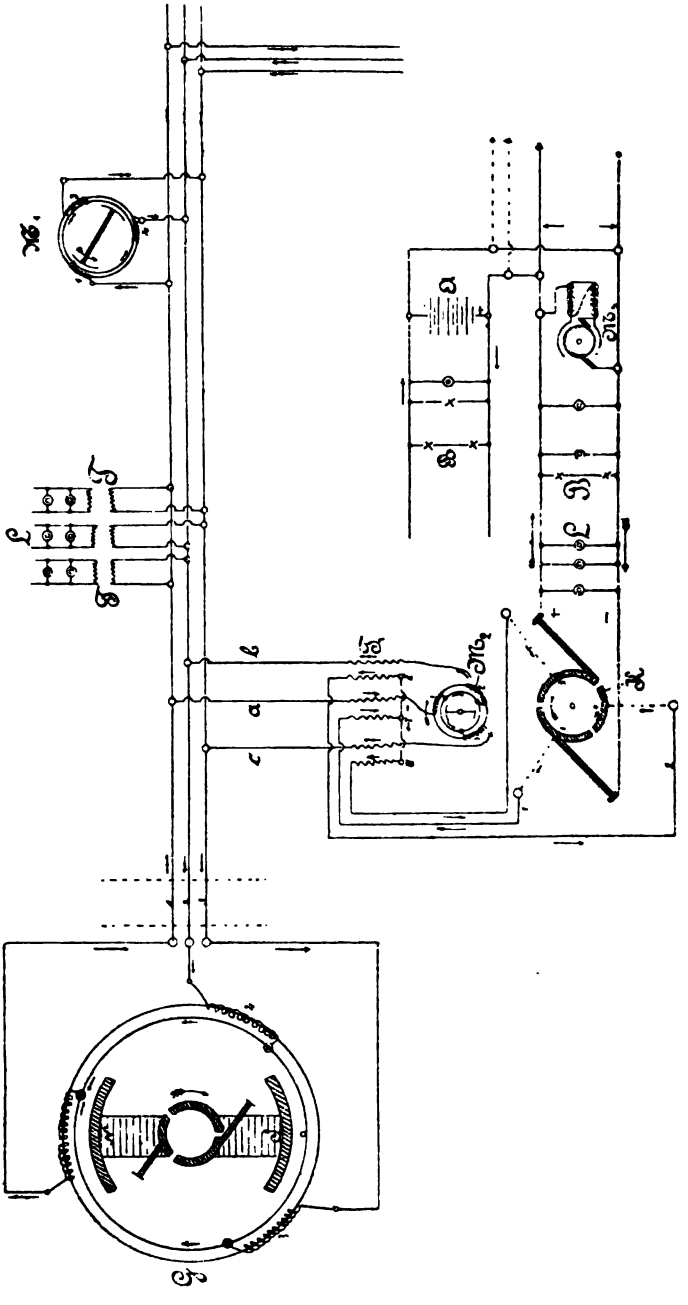


Fig. 110.

III. Abteilung.

Drehstrom-Dynamos.

Zweiphasen-Dynamo nach Tesla der Westinghouse E. a. M. C. — Dreiphasen-Dynamos der A. E.-G. — Dieselben neuester Konstruktion. — Dreiphasen-Dynamo der Fabrik Oerlikon. — Dreiphasen-Dynamo von Siemens & Halske. — Dreiphasen-Dynamo von Schuckert. — Verschiedene Konstruktionen von Hutin & Leblanc, von J. Sohlmann, von G. F. Dieckmann, von A.-G. vormals Schwartzkopff.

Wir unterscheiden, wie schon aus dem Kapitel über das magnetische Drehfeld erhellt, derzeit zwei Hauptgruppen von Dynamomaschinen für Drehstrom und zwar Erzeugermaschinen

1. für zweiphasigen und
2. für dreiphasigen Drehstrom.

Dynamos für zweiphasigen Drehstrom.

Die Maschinen dieser Gruppe konnten sich anfangs keine besondere Verbreitung erringen, denn die Fehler der Motoren für einfachen Wechselstrom sind auch bei diesem Systeme noch nicht ganz beseitigt; die Drehfelder, welche mit Strömen auf derartigen Maschinen erzeugt werden, pulsieren, und diese Pulsationen stören. Nur die Firma „Schuckert“ in Nürnberg hat versucht, diese Art des Drehstromes in die Praxis einzuführen und verdanken wir derselben die bezüglichen Erfahrungen. Die Firma Schuckert verwendete hierzu ihre bekannte Flachringmaschine (Fig. 111), (eine Type, welche nunmehr bei dieser Firma nicht mehr als Normaltype gehalten wird), setzte auf die Verlängerung der Welle vier voneinander gut isolierte Schleifringe aus Kupfer und ver-

band dieselben mit den Quadranten des Kollektors derart, wie dies schon im Detail bei der Fig. 27, Seite 42, und in der Fig. 59, Seite 92, gezeigt worden ist. In der Fig. 27 sind bei der Verbindung allerdings je zwei Quadranten zu einem Ganzen verbunden, weil dort nur einfacher Wechselstrom erzielt werden soll, während die Verbindung jedes Quadranten mit einem Schleifringe zweiphasigen Wechselstrom ergeben mufs, wie dies auf Seite 92 des weiteren ausgeführt wurde.

Derartige Maschinen sind demnach als Gleichstrom- oder auch als Wechselstrom-Maschinen zu verwenden. Auf die vor-

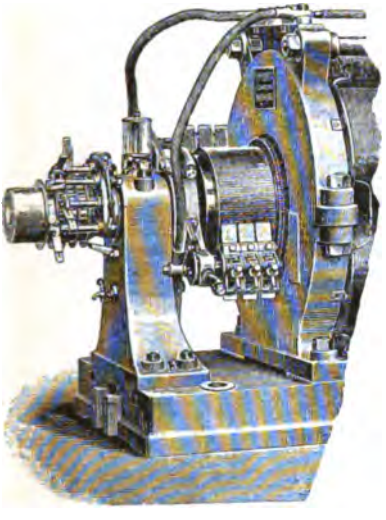


Fig. 111.

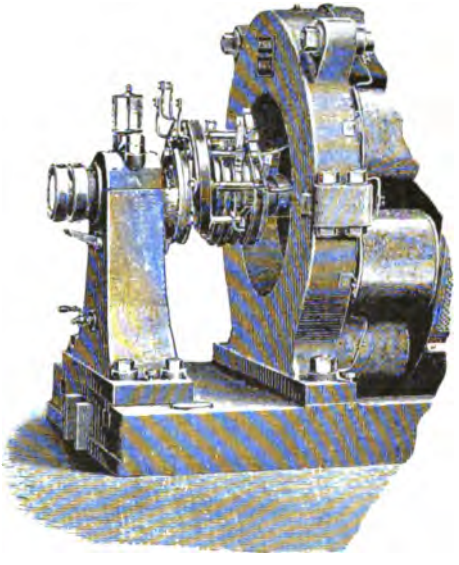


Fig. 112.

beschriebene Weise kann man aber jede Gleichstrom-Dynamo ebenso wie jede Wechselstrom-Dynamo als Maschine zur Erzeugung von Mehrphasen-Strom benutzen; nötig ist dazu nur die Anordnung einer Anzahl symmetrisch gelegener Ableitungen am Anker.

Betrachten wir die Fig. 26, Seite 41, welche das Grundschema der Umgestaltung einer Gleichstrom-Maschine in eine einfache Wechselstrom-Maschine veranschaulicht, so ist die effektive elektromotorische Kraft jeder Ankerhälfte

$$e_f = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}7\, E_{max}$$

und bei der Hintereinanderschaltung beider Ankerhälften

$$\Sigma e_f = 2\, e_f = 1{,}41\, E_{max}.$$

Beim Zweiphasen-Drehstrom, bei welchem die Ströme um 90° in der Phase verschoben sind, hat die elektromotorische Kraft einer Spule offenbar nur ein Viertel der Totalspannung, und der effektive Wert wird

$$e_f = \frac{0{,}7\, E_{max}}{2} = 0{,}35\, E_{max}.$$

Die Fig. 112 zeigt einen direkt geschalteten vierteiligen Stromabnehmer mit den zugehörigen Anschlufsklemmen. Es ist nicht bekannt geworden, ob sich in Europa noch eine andere Firma mit der Einführung solcher Maschinen in die Praxis beschäftigt hat.

Die Fig. 113 bis 115 zeigen einen Zweiphasen-Dynamo der Westinghouse E. a. M. C., worüber diese Gesellschaft nach dem

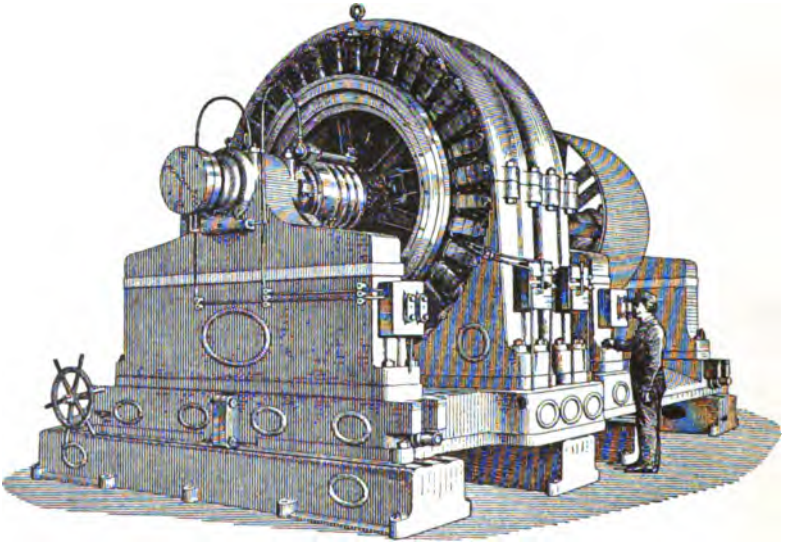


Fig. 113.

Berichte des Herrn Dr. J. Sahulka (siehe den offiziellen Bericht der K. K. Österr. Zentralkommission für die Weltausstellung in Chicago 1893) folgende Angaben macht:

1. Die Ströme sind um 90° in der Phase verschoben.

2. Maximalleistung 880 Kilowatt (zweimal 200 Ampère und 2200 Volt).

3. Normalleistung 750 Kilowatt.

4. 60 Perioden pro Sekunde.

5. Tourenzahl 200 pro Minute bei direkter Kuppelung mit der Dampfmaschine.

6. Die Elektromagneterregung erfolgt gleichzeitig sowohl durch Gleichstrom von 250 Volt als auch durch gleichgerichteten Wechselstrom.

Diese Maschine hat zwei vollständig getrennte Magnetfelder und Armaturen; letztere sind auf einer gemeinschaftlichen Achse befestigt und so gegeneinander verstellt, dafs der Phasenunterschied von 90° erreicht wird.

Jedes Magnetgestell besteht aus zwei gleichen gufseisernen Teilen und enthält im ganzen 36 radial gestellte Elektromagnet-

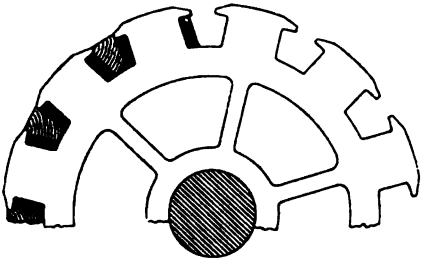


Fig. 114.

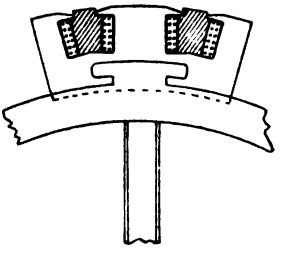


Fig. 115.

Eisenkerne, welche aus Eisenblechen bestehen, die durch je zwei starke Deckplatten zusammengehalten werden. Diese Kerne werden beim Gusse mit dem Kranze vereinigt. Die Spulenhalter bestehen ebenfalls aus Eisenblech, haben Prefsspan-Isolierung gegen die Multiplikation und werden mittels Messingplatten am Magnetkranze angeschraubt. Jede Spule besteht aus zwei Teilen. Die äufsere Spule hat ungefähr ein Drittel der ganzen Spulenlänge und ist zur Aufnahme des kommutierten Wechselstromes bestimmt; die innere, längere Spule wird von einem Gleichstrom (25 Ampère) durchflossen. Für diesen sind am Maschinengestelle besondere Bleisicherungen und Ausschalter angebracht; letztere tragen zwei gegenüberstehende Kohlenspitzen, durch welche sich der entstehende Extrastrom entladet.

Jede Armatur hat 32 Zähne, und sind nur die Kerne unterteilt. Dieselben bestehen aus 18 dünnen Blechen aus weichem Stahl, welche auch durch starke Deckplatten zusammengehalten werden.

Jedes Blech hat die Breite eines Zahnes und der benachbarten beiden Zahnhälften (Fig. 114 und 115). Zwei starke Speichenräder tragen die Armatur; der Kranz dieser Räder hat an beiden Stirnflächen je einen Wulst, welcher sich zu 18 plattenförmigen Angüssen erweitert, zwischen welchen die Armaturstücke eingeschoben werden. Der Zwischenraum zwischen dem Kranze und den Armaturkernen wird mit einer leicht schmelzbaren Legierung (Babbittmetall) ausgegossen. Die Spulen werden voneinander mittels Glimmer und in Öl gekochtem Holze isoliert und sind in Serie geschaltet. Mittels gewöhnlicher Kupferbleche wird der Strom von den Schleifringen abgenommen.

Die bei dieser Maschine vorkommenden vielen Abschmelzvorrichtungen bestehen aus je einem Aluminiumdrahte, welcher in eine mit einer Öffnung versehene Holzdose eingeschlossen ist. Der beim Abschmelzen entstehende Lichtbogen wird dann angeblich durch die infolge der Erwärmung ausströmende Luft ausgeblasen.

Im allgemeinen sei hier noch bemerkt, daſs man mittels ähnlicher passender Schaltungen auch „vierphasigen“ Drehstrom erzeugen, noch weitere Unterteilungen ausführen könnte. Bei einer beliebigen Zahl der Abteilungen am Anker ist dann:

$$e_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n} E_{max},$$

wobei n der Phasenzahl der entnommenen Wechselströme entspricht. Man ist aber von der Teilung in gerade Zahlen abgekommen, seit Dobrowolsky die Vorteile der „Dreiteilung“ so unwiderleglich, und zwar, wie wir gesehen haben, praktisch und theoretisch, nachgewiesen hat.

Dynamos für dreiphasigen Drehstrom.

In der zweiten Gruppe von Dynamos für Drehstrom ist bezüglich der Schaltungsweise das Schema Fig. 86 Seite 126 maaſsgebend, wenn, wie dies vorerst immer geschehen ist, gewöhnliche Gleichstrom-Maschinen zur Erzeugung des „Dreiphasen-Wechselstromes“ verwendet wurden.

Verschiebt man die Ströme in der Phase um 120 Grad, was dadurch geschieht, daſs man im Grammeschen Ringe drei um 120 Grad gegeneinander versetzte Punkte der Ringbewickelung

mit Schleifringen verbindet, wodurch bei der Rotation des Ankers im magnetischen Felde drei Ströme entstehen, deren Maxima und Nullwerte um 120 Grad von einander verschieden sind, dann wird man von den drei Schleifringen Leitungen nach aufsen führen können, welche zur Aufnahme jener Ströme dienen und deren Ausnützung als einfache Wechselströme oder verkettet in ihrer Wechselwirkung ermöglichen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dafs die algebraische Summe dieser drei Ströme immer gleich Null ist, also:

$$\left(\frac{J}{2}+\frac{J}{2}\right)-J=0,$$

$$(0{,}3\,J+0{,}7\,J)-J=0 \quad \text{u. s. f.}$$

Wichtig ist bei solchen Drehstrom-Dynamos die Schaltung der drei Spulen zu einander:

1. Verbindet man je ein Ende jeder Spule mit der Aufsenleitung und die übrig bleibenden drei Enden miteinander in einen Zentralpunkt, dann erhält man die offene oder Stern- Schaltung oder Verkettung. (Siehe Fig. 106.)
2. Verbindet man aber das Ende der einen Spule mit dem Anfange der nächsten Spule (Fig. 107 Seite 149), so nennt man diese Verbindung: geschlossene Dreieck- oder Ring- Schaltung oder Verkettung.

Die Höhe der zu erzielenden Spannungen hängt, wie bei allen Magnetoinduktoren, von der Anzahl der Windungen etc. ab. Bezüglich der erzeugten Energie gilt folgende Beziehung:

Erreichen wir bei der Dreieckschaltung z. B.

1 Ampère und 1,732 Volt,

so erhalten wir aus derselben Maschine unter Anwendung der Sternschaltung:

1,732 Ampère und 1 Volt.

Dreiphasen-Dynamo der A. E.-G.

Die Fig. 116 und 117 (Seite 162 und 163) zeigen uns Drehstrom-Dynamos, wie sie ursprünglich von der A. E.-G. (als

Type *D M*) gebaut wurden. Aus den Abbildungen ist die Zahl der das Feld erregenden Elektromagnete, der rotierende Anker und der dreiteilige Stromabnehmer zu ersehen. Der Strom für die Elektromagnete mufs natürlich aus einer anderen, und zwar konstanten Elektrizitätsquelle geliefert werden.

Die A. E.-G. baut diese Maschinen durchaus mit 100 Wechsel in der Sekunde. Die Wechselzahl der Drehstrom-Dynamo richtet

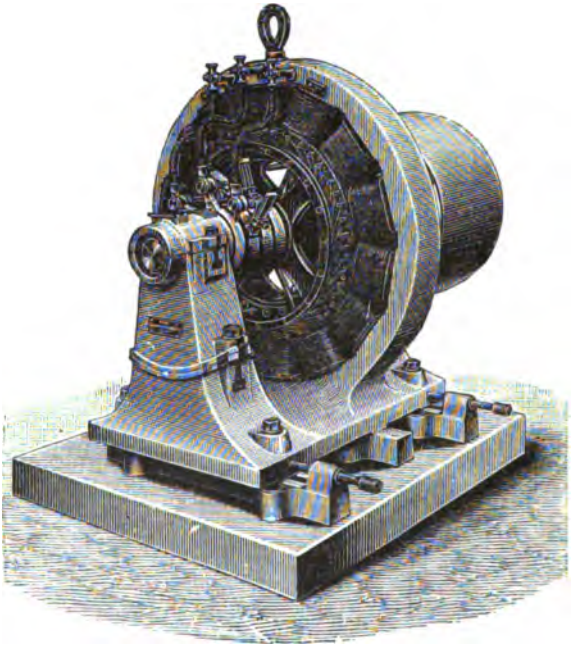


Fig. 116.

sich nach der Zahl ihrer Magnete und der Zahl der Umdrehungen in der Sekunde:

Die Wechselzahl = Polzahl × Umdrehungen in der Sekunde.

Es hat z. B. die A. E.-G. Drehstrom-Maschine DM_{300} 8 Pole und es ist $n = 750$, daher ist bei derselben:

$$\text{Wechselzahl} = 8 \times \frac{750}{60} = 100 \text{ Wechsel} = 50 \text{ Perioden.}$$

Die Wechselzahl ist für den Konstrukteur eine wichtige Ziffer; und wenn bei der Beurteilung einer Gleichstrom-Maschine die Zahl der geleisteten Watt genügt, so mufs bei allen Wechselstrom-Maschinen noch die Zahl der Wechsel angegeben werden,

wenn man sich ein richtiges Bild der Maschine und ihrer Leistungen schaffen will. Auch zur Wahl und Bauart, der durch solche Maschinen zu betreibenden Objekte, ist die Kenntnis der Wechselzahl eine unerlässliche Vorbedingung.

Im übrigen richtet sich die Konstruktion solcher Maschinen fast genau nach jenen Regeln, die im allgemeinen für den Bau

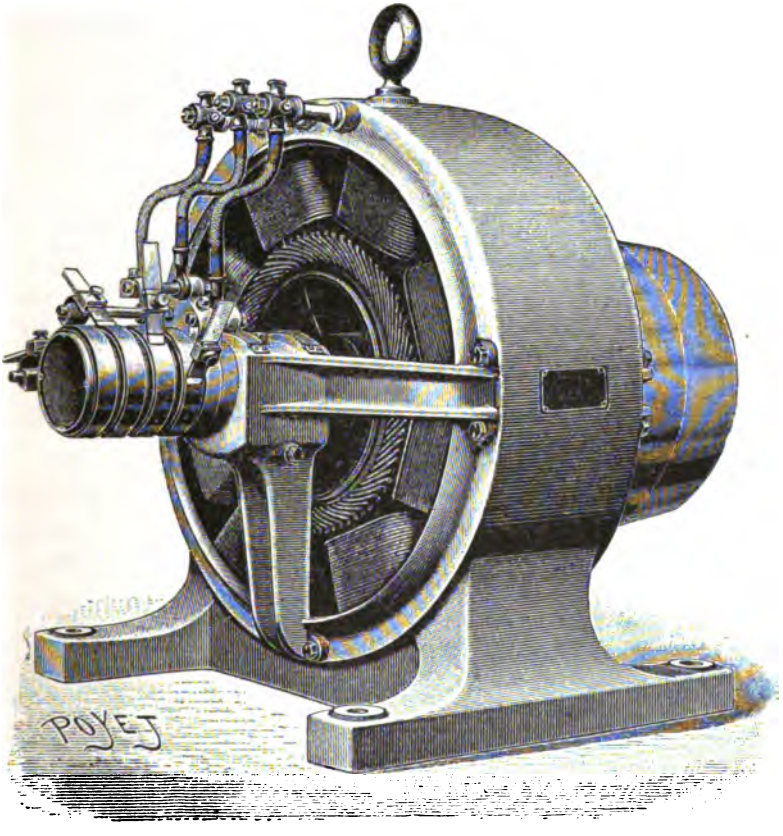


Fig. 117.

der Gleichstrom-Maschinen gelten. Allerdings macht die Bestimmung der exakten Werte für elektromotorische Kraft und Stromstärke in diesem Falle etwas mehr Schwierigkeiten.

Es ist selbstverständlich, dafs es zur Zeit unpraktisch wäre, Dynamos für Kraftabgabe zu bauen, die ein bestimmtes elektrisches System begründen, wenn dabei für elektrisches Licht

ein anderes System gewählt werden müfste. Alle Fabriken haben daher von vornherein angenommen, dafs Drehstromanlagen nicht nur Motoren treiben, sondern auch Bogen- und Glühlicht ohne jede Komplikation abgeben müssen. Licht erfordert aber eine bedeutende Frequenz (Bogenlampen brennen bei 80 Wechseln in der Sekunde nicht gut), daher wurde die obige Wechselzahl = 100 fixiert, und es hat sich gezeigt, dafs dadurch auch eine Vereinfachung in der Konstruktion der Drehstrom-Motoren ermöglicht wird.

Die nachfolgende Tabelle giebt an, in welchen Dimensionen diese ältere Type der Dreiphasen-Drehstrom-Dynamos von der A. E.-G. gebaut werden.

Gröfse	Spannung zwischen zwei Leitungen, Volt	Stromstärke in jeder Leitung, Ampère	Gesamtleistung bei induktionsloser Belastung, Watt	Kraftverbrauch b. induktionsloser Belastung PS	Gesamtleistung bei Motorenbelastung $\cos \varphi = 0{,}8$ Watt	Kraftverbrauch bei Motorenbelastung, PS	Umdrehungen pro Minute bei 100 Wechsel pro Sekunde	Gleichstrom-Erregung in Volt × Ampère
		ca.	ca.	ca.	ca.	ca.		ca.
DM_{300}	120	175	36 000	54	28 800	43	750	110 × 10
	190	110	36 000	54	28 800	43	750	110 × 10
DM_{600}	120	350	72 000	107	57 600	85	430	110 × 18
	190	220	72 000	107	57 600	85	430	110 × 18
DM_{810}	190	270			72 000	107	215	110 × 25

Die A. E.-G. hatte in Chicago eine Drehstrom-Dynamo ausgestellt und in Betrieb. Über diese Maschine wurden folgende Ziffern veröffentlicht:

Leistung: 72 Kilowatt,
Tourenzahl: 424 pro Minute,
Periodenzahl: 50 pro Minute,
Strom-Phasen-Differenz: 120 Grad,
Spannung: 120 Volt zwischen zwei Leitern,
Die Erregerarbeit: 700 Watt (Gleichstrom).

Die Maschine wurde mittels Riemen von einer 100pferdigen Gleichstrom-Dynamo (120 Ampère bei 500 Volt und 500 Touren) angetrieben. 14 radial angeordnete Feldmagnete umschlossen die Armatur. Letztere war ein Lochanker und hatte Trommel-

wickelung und Sternschaltung. Die Anzahl der Kupferleiter, aus welchen die Trommelwickelung besteht, ist kein Vielfaches der Anzahl der Feldmagnete; es waren vielmehr dreimal 52 = 156 Stäbe untergebracht und sind diese auf folgende Weise miteinander verbunden:

Man denke sich die Stäbe fortlaufend von 1 bis 156 numeriert. Nun ist der Schleifring 1 mit dem Stabe 1 verbunden, dieser (auf der Rückseite der Armatur) mit dem Stabe 12, dieser (auf der Vorderseite) mit Stab 23, und wenn man so, immer 11 Stäbe überspringend, vorwärts schreitet, kommt man schliefslich zum Stabe 94, welcher mit dem Armaturkern verlötet ist. Die so verbundenen 52 Stäbe bilden die Wickelung für den ersten Strom und es sind dieselben so verteilt, dafs man dabei den Umfang der Armatur $3^1/_3$ mal umkreist hat. Der zweite Schleifring ist mit dem Stabe 53, der dritte mit dem Stabe 105 verbunden. Das Eisen ist der gemeinschaftliche Ausgangspunkt für alle drei Ströme.

Die neuesten Konstruktionen der A. E.-G.-Drehstrom-Dynamo.

Am 22. Januar 1895 veröffentlichte Dobrowolsky im Berliner elektrotechnischen Vereine die Beschreibung zweier von der A. E.-G. neu konstruierter und ausgeführter Drehstrom-Dynamos. Dieser Konstrukteur benützt jetzt zur Erregung des Feldes bei den neuen Typen einen einspuligen Elektromagneten. Derselbe besteht aus einer feststehenden Multiplikationsspule *S* (Fig. 118). In dieser ist ein schaufelradförmiger Eisenkern *J* (Fig. 119) derart auf

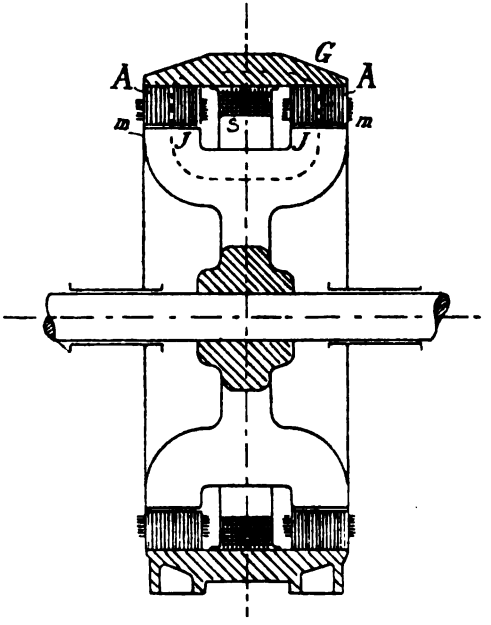


Fig. 118.

der Welle befestigt, dafs er rotiert werden kann. Zirkuliert nun in der Spule ein elektrischer Strom, der aus einer kleinen Gleichstrom-Dynamo oder aus einer Akkumulatorenbatterie beschafft werden mufs, so wird die Eisenmasse innerhalb der Multiplikation nach den bekannten Gesetzen magnetisch erregt und es werden die einseitigen Polhörner J nordpolarmagnetisch, alle Polhörner auf der anderen Seite südpolarmagnetisch; wir erhalten bei konstantem Erregerstrom konstante magnetische Verhältnisse zwischen der Spule und dem eisernen, schaufelradförmigen Kerne.

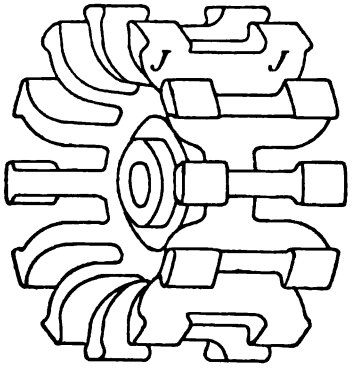


Fig. 119.

Bei der Rotation des Schaufelrades wird der Magnetismus der Polhörner weder quantitativ verändert, noch tritt ein Wechsel der Pole ein. Die Erregerspule S ist in einem eisernen Gehäuse

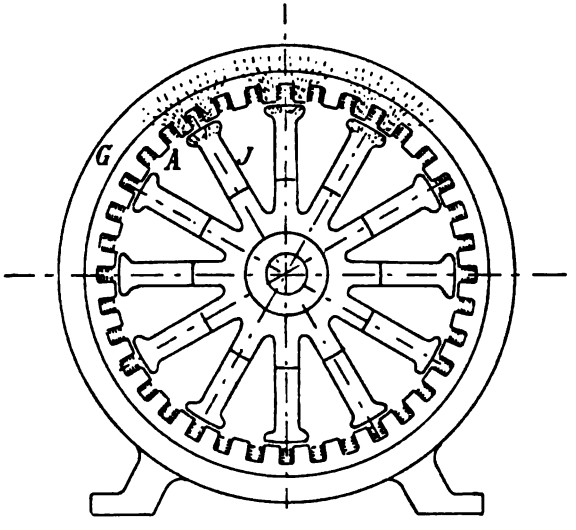


Fig. 120.

G eingeschlossen; dasselbe trägt aber auch einen mit nach innen gerichteten radialen Eisenkernen A besetzten Ring und sind die Kerne, welche aus unterteilten Eisenplatten bestehen, mit Spulen

umgeben, welche nach dem dreiphasigen Drehstrom-Systeme zusammengeschaltet sind.

Zirkuliert in S ein elektrischer Strom, dann wird der schaufelradförmige Eisenkern magnetisch erregt und beim Stillstande verlaufen die Kraftlinien, wie es in den Fig. 120 und 121 ersichtlich gemacht worden ist. Aus der Fig. 120 ist noch besonders zu ersehen, dafs in der Maschine 36 umwickelte Eisenkerne (also per Polhorn drei) angeordnet sind. Es wird nicht schwierig sein zu begreifen, wie die Spulen miteinander verbunden sein müssen, damit sie dreiphasigen Drehstrom in die Linie entsenden. Bewegt sich nämlich der Eisenkern um seine Achse, dann werden je drei Spulen von den vorbeirotierenden Polhörnern bezw. von den Kraftlinien, welche dieselben aussenden, nacheinander induzierend beeinflufst; denn die Kraftlinienzahl, welche die Eisenkerne und Multiplikationsspulen trifft, ist eine variable und es müssen daher Induktionswirkungen nach den bekannten Regeln ausgeübt werden, d. h. an den Enden der Spulen mufs elektrische Spannung auftreten, die in der gebräuchlichen Art kombiniert und ausgenutzt werden kann. Bezüglich des Kraftlinienverlaufes sei noch erwähnt, was übrigens schon aus der Fig. 120 erhellt, dafs der Mantel dazu dient, den Kreislauf der Kraftlinien mit möglichst wenig Widerstand zu ermöglichen.

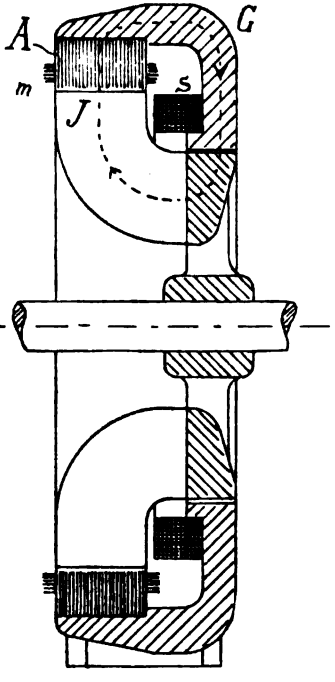


Fig. 121.

Das Studium der Schemata Fig. 118 und 120 und das vorstehend Gesagte genügt wohl, um zu zeigen, dafs wir hier eine Drehstrom-Dynamo ohne Schleifringe, also ohne lose Kontakte haben; eine Dynamo, deren Funktionsweise leicht erklärlich ist, die ohne unüberwindliche Schwierigkeiten bezüglich ihrer Wirkungen berechnet werden kann, und in der eine bedeutend bessere

Materialausnutzung, wie bei den meisten übrigen elektrischen Maschinen, erzielt ist.

Die Wartung und Regulierung solcher Maschinen erstreckt sich auf das Schmieren der Lager; eine Beschädigung oder Abnutzung solcher Maschinen ist nicht abzusehen. Dieser Maschinentypus ist für gröfsere Tourenzahlen, also nicht zum direkten Antriebe bestimmt.

Die A. E.-G. baut aber noch eine zweite derartige Type und zwar für direkten Antrieb, also für geringe Tourenzahl.

Die Fig. 122 und 123 zeigen die bezüglichen Schemata: In Fig. 123 bedeutet S wieder die feststehende Erregerspule, welche

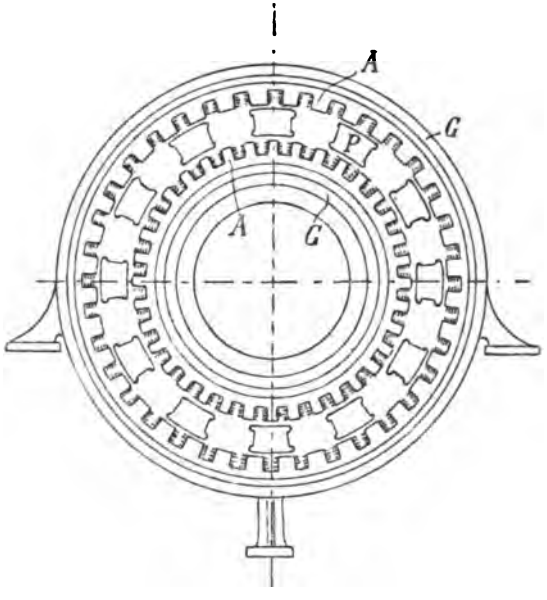


Fig. 122.

ihren konstanten Strom von auswärts erhält. Der so erzeugte magnetische Kraftflufs geht durch den Eisenmantel G und die beiden Ankerringe A. Der bedeutende Raum zwischen den beiden Ankerringen wird zeitweilig und regelmäfsig aufeinander folgend durch die beweglichen Polhörner P geschlossen.

Bei der Drehung dieser am Schwungrade der Dampfmaschine befestigten Polstücke wandern offenbar die Stellen höchster magnetischer Dichte an den Oberflächen der beiden Anker entlang,

so dafs die Ankerspulen m, welche in der Fig. 123 deutlich zu sehen sind, eine Induktion erfahren.

Durch passende Schaltungen und Dimensionierungen kann man aus einer solchen Maschine einfachen Wechselstrom oder Drehstrom in beliebigen Phasen entnehmen. Fig. 124 zeigt die Verbindung der Spulen zur Entnahme dreiphasigen Stromes. Auch hier giebt es keine Schleifkontakte und aufser der Lagerschmierung ist keine Wartung der Maschine nötig. Diese Dynamo ist kräftig gebaut und aus nur wenigen Stücken zusammengesetzt. Bewegt werden nur die aus unterteiltem Eisen aufgebauten Polstücke P, alle anderen, also besonders die Teile, in welchen die Ströme erregt werden, stehen still und sind daher keiner Abnutzung unterworfen. Falls Störungen zu beheben sind, welche von Aufsen kommen, denn die Maschine für sich kann ja gar keine Veranlassung zu einer Störung geben, ist vorgesorgt, dafs der eine Teil leicht abgehoben werden kann, um den Weg zum Innern der Maschine frei zu machen, um auch — wenn es gewünscht wird — Änderungen in der Schaltung vornehmen zu können.

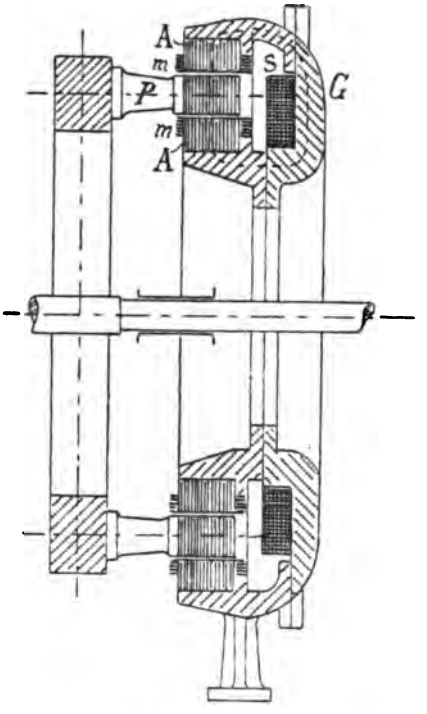


Fig. 123.

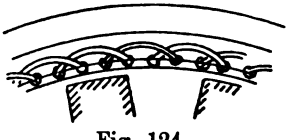


Fig. 124.

Die magnetische Erregung solcher Maschinen verursacht nur sehr wenig Kosten an Kupfer und Kraft; weil ferner in den Induktionsspulen die sogenannte „Stabwickelung“ angewendet werden kann, wird auch der Spannungsabfall in solchen Dynamos minim; und das sind zwei Vorteile, die bei grofsen Maschinen nicht unwichtig sind. Man kann mit sehr hoher magnetischer Sättigung arbeiten und braucht

daher wenig Induktionswindungen. Nachdem auch die Hysteresis und Streuung bei solchen Anordnungen gering sind, ist selbstredend der Wirkungsgrad ein erfreulicher und sehr zufriedenstellender.

Bei der A. E.-G. wurden für die Zentrale in Strafsburg derartige Maschinen für direkte Kuppelung mit den Dampfmaschinen und zwar drei Maschinen für je 400 und zwei Maschinen für je 200 PS gebaut.

Dobrowolsky giebt bezüglich der 400 PS Maschine folgende technische Details:

Leistung: 280 Kilowatt bei 2750 Volt,
Tourenzahl: 150 in der Minute,
Polzahl: 40,
Kupfergewicht der Erregerspule: 730 kg, } das sind also
„ „ beiden Anker: 200 kg, } 2 kg Kupfer pro PS,
Erforderliche Erregung: 4000 Watt, also $\sim 1{,}4\,\%$,
Wattverbrauch in den beiden Ankern zusammen: $2\,\%$,
Hysteresis: total $\sim 1{,}3\,\%$,
Eisengewicht des Gehäuses: 6000 kg,
„ der beiden Anker: 2000 „
„ der Polstücke: 750 „
Eisen zusammen: 8750 kg

(exkl. Welle und Lager). Die Fig. 125 zeigt das Bild einer solchen Maschine. Das Verhältnis der effektiven Ampèrewindungen einer Ankerspule zu den Ampèrewindungen der Erregerspule beträgt ca. 1 : 15.

Die A. E.-G. baut die neue Type (O) der Drehstrom-Dynamos in folgenden Abmessungen:

O_{700} für 72,800 Kilowatt bei $n = 215$ pro Min. u. bei 6000 Wechsel,
O_{1000} „ 99,500 „ „ $n = 180$ „ „ „ „ „ „
O_{1500} „ 151,100 „ „ $n = 150$ „ „ „ „ „ „
O_{2000} „ 200,800 „ „ $n = 120$ „ „ „ „ „ „
O_{3000} „ 304,000 „ „ $n = 120$ „ „ „ „ „ „

Prof. Arnold behauptet, dafs die Leistungsfähigkeit einer solchen unipolar gebauten Mehrphasen-Maschine bei demselben Wirkungsgrade und derselben Betriebssicherheit auf das Doppelte

einer ungefähr gleichschweren, mehrpoligen Maschine gebracht werden kann.

Es ist richtig, dafs die Abkühlungsfähigkeit der ruhenden Wickelung, in welcher Induktionswirkung erzielt wird, nur gering ist und bei der starken Beanspruchung eventuell sogar besonderer Abkühlungsvorrichtungen bedürfen würde, wenn es den Konstrukteuren nicht gelingt, Dimensionen festzustellen, bei denen die Erwärmung nicht gröfser ist als bei Gleichstrom-Maschinen.

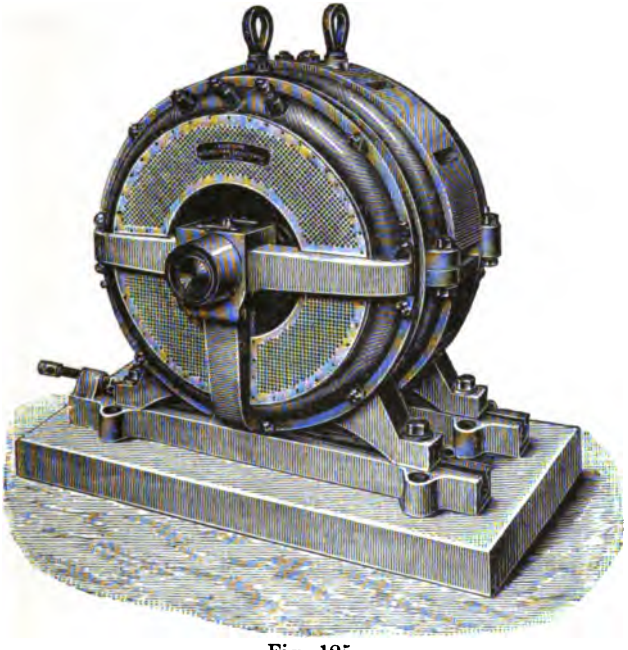


Fig. 125.

Dass dieses Ziel nicht unerreichbar ist, wird jeder gerne glauben, der die Entwickelung des Dynamo-Maschinenbaues in den letzten Jahren aufmerksam verfolgt hat.

Der Wirkungsgrad so grofser Maschinen kann mit ca. 0,92 angesetzt werden. Die Leistungen sind verschieden: Erhält man bei reinem Glühlampenbetriebe, also bei selbstinduktionsfreiem äufseren Widerstande, die Maximalleistung, so kann diese bis auf 72% ihres Wertes sinken, wenn nicht selbstinduktionsfreie Objekte, also z. B. Elektromotoren betrieben werden.

Es empfiehlt sich, die Maschinen derart zu bauen, dafs die

Spannungsänderung zwischen Leerlauf und Vollbelastung bei gleichbleibender Erregung und induktionsfreiem Betriebe nicht mehr als 7% beträgt. Bei Motorenbetrieb wird infolge der Phasenverschiebung zwischen der Strom- und der Spannungskurve der Abfall bedeutender, er soll aber 28% nicht überschreiten.

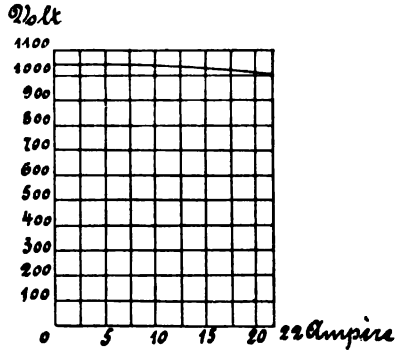


Fig. 126.

Das Diagramm Fig. 126, aufgenommen in Oerlikon, zeigt die Charakteristik eines hundertpferdigen Hochspannungs-Generators. Als Abscissen sind die Stromstärken eines der drei Hauptstromkreise aufgetragen, während die Ordinate die „Schenkelspannungen", d. h. die Spannungen zwischen jeder der drei Hauptklemmen und der allen drei Stromkreisen gemeinsamen Verbindungsklemme darstellen. Bei der Aufnahme der Charakteristik wurde die Tourenzahl ($n = 600$) und die Erregerstromstärke konstant gehalten und es wurde beobachtet, dafs in diesem Falle die Maschinenspannung nur um 4% steigt, wenn die Gesamtbelastung plötzlich ausgeschaltet wird.

Es ist für den Betrieb grofser Zentralen von Wichtigkeit, dafs je nach Bedarf selbst grofse Maschinen und Maschinengruppen parallel geschaltet werden können. Sowohl bei Wechselstrom-Maschinen als auch bei Drehstrom-Maschinen ist diese Parallelschaltung abhängig von dem Gesetze, nach welchem sich die Änderungen und die Wechsel der elektromotorischen Kraft vollziehen, mit anderen Worten: von der Form der Spannungskurve. Wird diese im Momente der Belastung durch den in der Armatur auftretenden Strom sehr beeinflufst, so ist eine Parallelschaltung nur schwierig ausführbar und es ist die Möglichkeit vorhanden, dafs die Maschinen „aus dem Tritte fallen". Wenn dieselben aber starke magnetische Felder besitzen, wenn sie ihre Spannungen bei Belastungsvariationen konstant erhalten und wenn die Ankeroberfläche eine kontinuierliche oder nahezu kontinuierliche ist, dann ist die Parallelschaltung möglich und jederzeit sicher durchführbar.

Die Fabrik „Oerlikon“ baut zwei verschiedene Typen von Drehstrom-Generatoren:

1. für Niederspannung und
2. für Hochspannung.

Für Übertragung auf sehr grofse Distanzen (15 bis 30 km) erweist es sich aus ökonomischen Gründen als nötig, sehr hohe Spannungen, 5000 bis 15 000 Volt, auf der Linie zu wählen. Da wegen der Sicherheit des Betriebes weder der Generator noch der Motor für diese hohen Spannungen konstruiert werden können, so verwendet man in solchen Fällen Generatoren von niederer Spannung und erzeugt die notwendige Linienhochspannung mittels Transformatoren in der Primärstation; in der Sekundärstation wird durch Rücktransformation die zum sicheren Betriebe der Motoren nötige Niederspannung erzeugt; eine solche Anordnung ist in Fig. 127 abgebildet.

Bei Kraftübertragungen auf geringere Distanzen (unter 15 km) läfst sich die 5000 Volt

Fig. 127.

Linienspannung in der Regel noch ökonomisch mittels Dynamos direkt erzeugen, wodurch die doppelte Transformation vermieden wird, da in diesem Falle die einfache Transformation in der Sekundärstation ausreicht.

Die feststehende Armatur besteht aus einem durch einen zweiteiligen Gufsrahmen zusammengehaltenen, aus weichen Eisenblechen hergestellten Körper, an dessen Umfang die Niederspannungswickelung in Löchern eingesetzt ist. Da diese Wickelungen bedeutende Stromstärken auszuhalten haben, sind sie aus kräftigen Stäben von Rundkupfer gebildet, die an den Stirnflächen durch entsprechend geformte, gabelartige Verbindungsstücke zu einer Trommelwickelung verbunden sind. (Tafel VIII Fig. 3.)

Die Wickelung bildet in der Regel drei Stromkreise, entsprechend dem Komplexe der drei Wechselströme, die erzeugt werden sollen. Die Isolierung der Stäbe erfolgt durch Röhren aus Asbestpapier. Abgesehen von der dadurch erreichten kräftigen mechanischen Konstruktion, hat diese Wickelung noch den Vorteil, dafs durch die Einbettung der Kupferstäbe in die Löcher des Armatureisens dieselben durchaus vor schädlichen, das Kupfer erhitzenden Wirbelströmen geschützt werden.

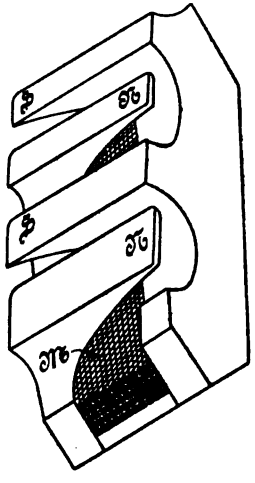


Fig. 128.

Der rotierende Feldmagnet besteht aus zwei durch Bolzen zusammengehaltene Teile aus weichem, sorgfältig ausgeglühtem Stahlgufs. Er wird durch eine einzige zentrale Spule *M* (Fig. 128) magnetisiert, welcher durch zwei Schleifringe der Erregerstrom aus einer konstanten Elektrizitätsquelle zugeführt wird. Die zur Erregung nötige Energie ist eine geringe und beträgt ca. 0,5 bis 1,0% der Gesamtleistung. (Tafel VIII Fig. 2.)

Bei Hochspannungs-Dynamos mufs natürlich in der Armatur ein wesentlich anderer Aufbau gewählt werden. Hier ist die sorgfältige Isolierung die Hauptsache. Die einzelnen Armaturspulen werden in Formen auf der Wickelbank fabrikationsmäfsig genau gewickelt, jede für sich isoliert und hierauf mittels besonderer Vorrichtungen in die zu ihrer Aufnahme bestimmten

und mit kontinuierlicher Glimmerisolation ausgelegten Nuten eingepreſst. Man ist auf diese Weise im stande, jede Spule separat aus der Armatur zu entfernen und dieselbe, wenn nötig, durch eine andere zu ersetzen. Die Drahtstärken für die Armatur solcher Maschinen sind natürlich, wie bei allen solchen Maschinen, nach der Strombelastung zu berechnen, wobei auf Erwärmung und Spannungsabfall Rücksicht genommen werden muſs.

Der rotierende Magnetkranz hat im allgemeinen dieselbe Konstruktion, wie bei Niederspannungs-Maschinen, doch sind hier an den Polen der Stahlguſskerne Ansätze aus weichen, durch Bolzen zusammengehaltenen Eisenblechen aufgeschraubt. Dadurch wird die Erhitzung der Polspitzen und der dadurch veranlaſste Energieverlust, welcher bei der vorher beschriebenen Armaturkonstruktion ganz unvermeidlich wäre, hintangehalten. (Tafel VIII Fig. 5.) Die Erreger-Dynamo ist bei Hochspannungs-Maschinen direkt mit der Welle der letzteren gekuppelt. (Tafel VIII Fig. 1.)

Oerlikon hat solche Maschinen bezw. deren rotierende Teile direkt (und zwar horizontal) auf die Turbinenwellen gesetzt und sollen damit gute Resultate erreicht worden sein. (Tafel VIII Fig. 4.)

Die Erhaltung konstanter Spannung ist bei diesen Maschinen ohne Schwierigkeiten möglich und können dieselben daher auch zumeist ohne weiteres parallel geschaltet werden.

Ein mehr historisches Interesse hat die von „Oerlikon“ (Konstrukteur C. E. L. Brown) zur Kraftübertragung Frankfurt-Lauffen gebaute erste groſse Dreiphasen-Maschine, welche in der Fig. 2 Tafel V dargestellt ist.

Dieselbe leistete bei 150 Touren in der Minute 300 PS. Die Spannung eines jeden der drei Ströme betrug 50 Volt und hatte dabei 1400 Ampère. Das gesamte Kupfergewicht des Magnetfeldes betrug 300 kg. 100 Watt genügten zur Erregung während der Normalleistung.

1,6 bis 1,7% der vollen Maschinenleistung gingen durch Lager- und Luftreibung, durch Hysteresis etc. verloren. Totalgewicht der Maschine: 9000 kg.

Um die Abnahme so groſser Stromstärken durch Schleifringe zu vermeiden, war die Armatur ruhend und das Magnetfeld rotierend ausgeführt. Entsprechend dieser groſsen Stromstärke

erhielt die Armaturwickelung auch einen aufsergewöhnlichen Querschnitt und es wurde von der Anordnung mehrerer parallel geschalteter Stromkreise abgesehen.

Die Leiter, in diesem Falle massive Kupferstangen von 29 mm Durchmesser, waren in entsprechenden Löchern des Armatureisens gelagert und durch Asbestrohre von demselben isoliert. Durch diese Anordnung gewinnt man folgende ganz wesentliche Vorteile:

Foucaultströme, welche bei Verwendung solch massiver Leiter in gewöhnlicher Anordnung in enormer Stärke auftreten würden, sind hier nicht vorhanden. In der That war es bei Versuchen mit in Locharmatur gelagerten Barren bis zu 5 cm Durchmesser unmöglich, auch nur die geringste Spur von Kraftkonsum durch Foucaultströme zu konstatieren.

Die Lagerung der Barren in Löchern gestattet zudem eine äufserst praktische Ausführung der Armatur, speziell auch hinsichtlich der Isolation, welche aufserdem durch Verwendung von Asbest die Herstellung eines vollständig unverbrennlichen Ankers ermöglicht.

Mechanisch ist die Wickelung gegen äufsere Beschädigungen vorzüglich geschützt und es kann natürlich auch bei Überlastung und Kurzschlüssen ein Verschieben und Verletzen der Drähte nie auftreten.

Ferner genügt infolge der äufserst günstigen Raumausnutzung und der Reduktion des Luftwiderstandes eine bedeutend geringere Magneterregung, als dies mit gewöhnlichen Armaturen der Fall wäre, so ist beispielsweise die auf den beiden perspektivischen Ansichten dargestellte kleine Maschine zur Erregung der grofsen vollkommen ausreichend.

Locharmaturen für Gleichstrom-Maschinen wurden in Oerlikon schon seit 1885 gebaut; bei der Konstruktion der hier beschriebenen Maschinen treten jedoch die Vorteile dieser Armaturgattung in hervorragenderer Weise hervor als je.

Entsprechend der Polzahl 32 des Magnetfeldes sind pro Armaturstromkreis 32 Stäbe angeordnet, die durch entsprechende Querstücke an den Enden alle in Serie geschaltet sind. Die Armatur besitzt infolge ihrer drei Stromkreise somit dreimal 32 = 96 Löcher, bezw. Stäbe. Die Verbindung der drei Stromkreise untereinander ist in analoger Weise wie bei der Thomson-Houston-Bogenlicht-Maschine ausgeführt. Die Kupferstangen

1, 4, 7, 10 . . . 94,
95, 92, 89, 86 . . . 2,
93, 90, 87, 84 . . . 3

sind hintereinander mittels dicker Kupferbänder zu drei fortlaufenden Zickzacklinien verbunden.

Das Armatureisen wird durch einen Gufsrahmen zusammengehalten, welcher durch entsprechende Füfse auf der Fundamentplatte steht und zwecks Montage oder Reinigung in achsialer Richtung verschoben werden kann. Das Magnetfeld der Maschine besitzt die Eigentümlichkeit, dafs alle Pole beider Zeichen durch eine einzige Erregerspule erzeugt werden. Durch folgende einfache Anordnung wird dies erreicht:

Auf einem Gufsringe mit zwei Flanschen ist die Magnetisierungsspule aufgewickelt. Zwei Stahlringe mit je 16 Polhörnern sind beiderseits an den Gufsring angelegt, entsprechend verschraubt, und dabei ist die Stellung der Polhörner so gewählt, dafs dieselben zwischeneinander hineingreifen, so dafs bei erregter Spule aufsen abwechselnd positive und negative Pole entstehen, wobei der eine Stahlring lauter positive, der andere lauter negative Pole erhält (siehe Fig. 128 und Fig. 2 Tafel VIII).

Diese Anordnung gestattet eine gute Ausnutzung der Magnetwickelung und infolgedessen bedeutende Reduktion des Kupfergewichtes, gleichzeitig entsprechend geringere Erregungsarbeit, wie aus den angegebenen Daten hervorgeht. Zudem ist die Konstruktion dieses Feldes von grofser Einfachheit und Solidität; das ganze Magnetfeld mit 32 Polen besteht aus nur vier Stücken, was in Anbetracht dessen, dafs das Feld rotiert, nicht zu unterschätzen ist.

Behufs Zuführung des Erregerstromes waren zwei auf der Nabe sitzende Ringe durch einfache Metallsaiten mit zwei am Maschinengestell befestigten Rollen verbunden, wobei diese Saiten die Stromüberführung von den äufseren Klemmen zu den beiden Nabenringen vermitteln. Das Magnetfeld war fliegend auf einer entsprechend starken Welle befestigt, welche in einem kräftigen doppelten Lagerbocke ruht, der selbst mit der Grundplatte verschraubt ist. Das freie, hintere Ende der Welle stand in mittelbarer oder unmittelbarer Verbindung mit der Kraftabgabe- oder Entnahmestelle.

Selbstverständlich konnte die beschriebene Maschine auch

als Motor arbeiten, in welchem Falle dieselbe synchron mit dem Generator läuft, jedoch, entgegen einer gewöhnlichen Wechselstrom-Maschine, von selbst angehen kann. Naturgemäfs darf das Feld erst erregt werden, nachdem der Synchronismus erreicht ist. Für den Fall, dafs Generator und Motor gleichzeitig in Gang gesetzt werden, kann die Magneterregung von Anbeginn an erfolgen und die Anfangszugkraft ist in diesem Falle eine ganz erstaunlich grofse.

Die „neue“ Dynamo für ein- oder mehrphasigen Wechselstrom der Fabrik „Oerlikon“ gehört aber zur Klasse derjenigen Strom-

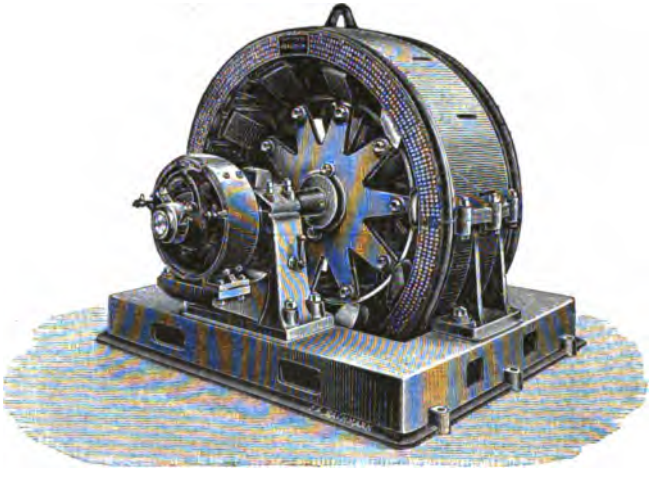


Fig. 129.

erzeuger, bei welchen die Induktion durch Veränderung der magnetischen Feldstärke ohne Umkehrung des Magnetismus erfolgt, so wie wir dies bei der Erläuterung der neuen A. E.-G.-Maschinen betrachtet haben (Seite 165). Ein eiserner Hohlzylinder (Mantel) enthält zwei aus unterteiltem Eisen hergestellte Ringe. Diese tragen die Ankerspulen oder die induzierten Windungen und es sind dieselben in Nuten oder Löchern nahe an der inneren Fläche der Ringe untergebracht. Zur Erzeugung des magnetischen Feldes dient ein Eisenzylinder, welcher auf der Welle befestigt und von der magnetisierenden Spule umgeben ist. Diese letztere erhält den erregenden Gleichstrom durch Schleifringe und Bürsten. Der Eisenkern wird von der Spule so magnetisiert, dafs an beiden Zylinderenden entgegengesetzte

Polaritäten herrschen. Letztere teilen sich den an den beiden Enden des Kernes angebrachten Vorsprüngen mit. Der Kreislauf der Kraftlinien in dieser Maschine ist nun folgender: Aus dem Magnetkerne zuerst in die eine Reihe der Polvorsprünge, von da in einen der Blechringe, aus diesem treten die Kraftlinien erst in den äufseren Mantel, sodann in den zweiten Blechring und schliefslich durch die diesem Ringe entsprechende zweite Reihe von Polzähnen zurück in den Magnetkern.

Bei der Drehung dieses Elektromagneten wandern in den Ringen die Stellen des dichtesten magnetischen Feldes entsprechend der jeweiligen Lage der Vorsprünge (Zähne). Die Windungen, welche auf den Ringen angebracht sind, befinden sich also bald in einem starken magnetischen Felde, bald in einem verhältnismäfsig sehr schwachen, was Wechselstrom-Erregung, die von der Schaltung bezw. Zahl und Lage der Spulen abhängt, zur Folge hat. Man kann daher aus dieser Maschine einfachen und mehrphasigen Wechselstrom abnehmen.

Die Erregermultiplikation kann entweder aufgewickelt sein, oder zur Verminderung der toten Last feststehen, wobei sie dann ohne Beeinträchtigung der Wirkung an der Drehung nicht teil nimmt.

Die Wirkungsweise beruht lediglich auf dem Schwanken der Feldstärke an den gegenüberliegenden Teilen der beiden Ringe und es ist dabei nicht nötig, dafs die Anzahl der Zähne auf beiden Seiten die gleiche ist. (Siehe auch Tafel VIII und Text Seite 209.)

Die von Siemens & Halske in Berlin gebauten Dynamos für Dreiphasen-Wechselstrom (Fig. 130, S. 180) bestehen aus einem feststehenden Ringe *A* und dem rotierenden, inneren Radsterne *K*. Nach Angaben dieser Firma sind diese beiden Teile aus lammelliertem Eisen angefertigt. Der Radstern trägt Polansätze *E* und sind um dieselben die Erregermultiplikationen *M* gewickelt, welche mit Gleichstrom gespeist werden, weil die Zusammenstellung *K*, *E* und *M* das rotierende Magnetfeld bilden. Der Gleichstrom wird mittels der Schleifringe *ss* zugeführt. Der durch Bolzen zusammengehaltene äufsere Ring enthält am inneren Umfange Nuten und zwar je drei für jeden Magnetpol. In die Nuten werden isolierte Kupferstäbe eingelegt; diese nach dem Schema Fig. 131 (S. 180) verbunden und wird dadurch der Leiter gebildet, in welchem die Induktionswirkungen erzielt werden.

Siemens & Halske bauen solche Maschinen von 20 bis 650 Kilowatt.

In Chemnitz ist in der Zentralstation eine solche Drehstrom-

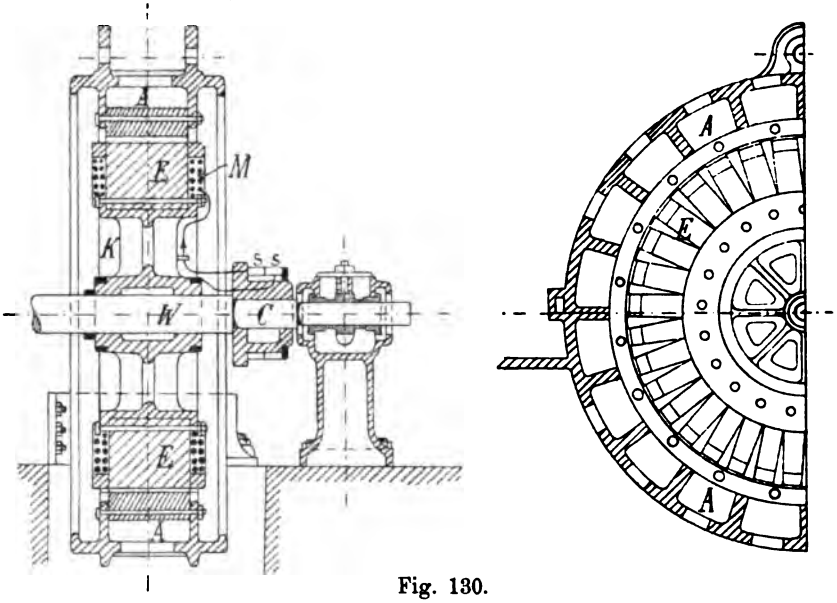


Fig. 130.

Dynamo von Siemens & Halske aufgestellt, welche bei 150 Umdrehungen pro Minute 2000 Volt und 52 Ampère, also:

$$\sqrt{3} \cdot 2000 \cdot 52 = \sim 180 \text{ Kilowatt}$$

liefert. Dieselbe wird von einer kleinen 120voltigen Gleichstrom-Dynamo erregt, welche direkt auf der Drehstrom-Maschinenachse sitzt.

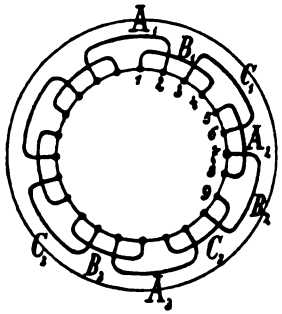


Fig. 131.

Auch die Chemnitzer Drehstrom-Dynamo besteht aus einem äufseren, feststehenden Ringe, innerhalb welchem ein sternförmiger Kern aus Eisen rotiert. Ring und Stern sind aus unterteiltem Eisen aufgebaut, letzterer hat 40 Polhörner. Der feststehende Ring hat pro Pol drei Nuten und ist in letzterem die aus drei Teilen bestehende Wickelung eingelassen; die Schaltung dieser Wickelungen entspricht im allgemeinen dem Schema Fig. 131. Auf das Übergreifen der Wicke-

lungen von 1 nach 4, 3 nach 6 u. s. f. wird besonders aufmerksam gemacht und nachdem die Wickelung von 4 nach 1 u. s. f. auf der anderen Seite zurückgeht, so werden auf diese Weise geschlossene Schleifen gebildet.

Bei Hochspannungs-Maschinen sind die Spulen $A_1 A_2 A_3 A_4$, ferner $B_1 B_2 B_3 B_4$ und $C_1 C_2 C_3 C_4$ hintereinander geschaltet;

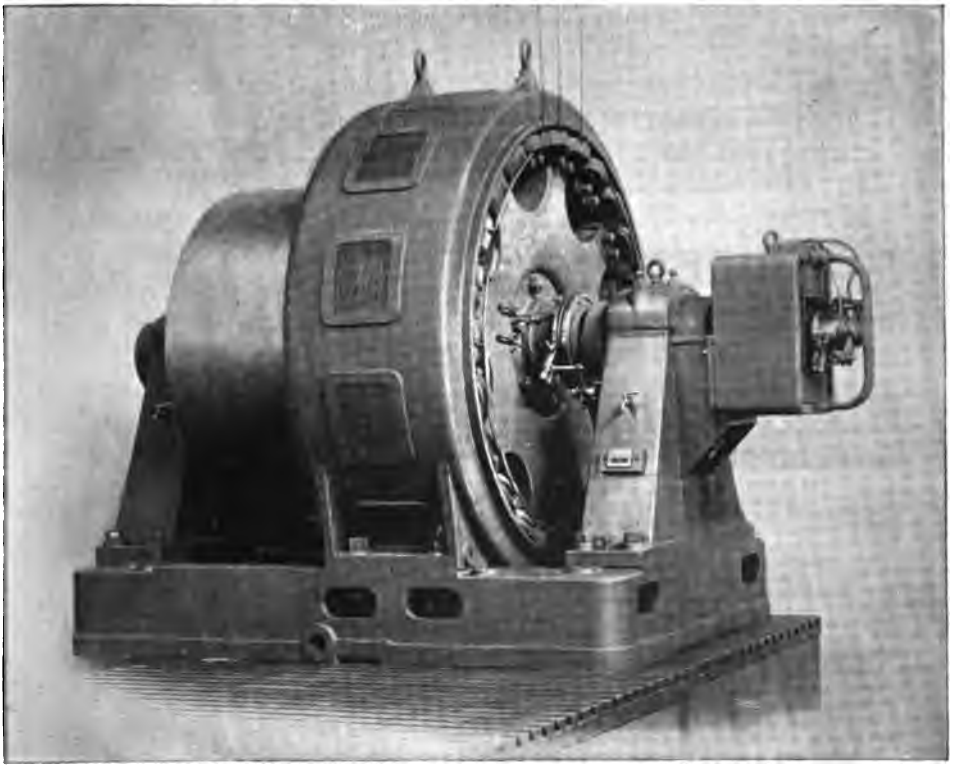


Fig. 132.

einerseits sind die Enden aller drei Abteilungen im neutralen Punkte vereinigt, die anderen drei Endengruppen führen zu den drei Klemmen der Maschine, so dafs dieses Schema der Sternschaltung entspricht.

Die Fig. 132 zeigt eine dreiphasige Wechselstrom-Dynamo, wie sie neuerer Zeit von der Firma „Schuckert“ in Nürnberg gebaut werden. Die Erreger-Maschine ist auf der rotierenden

Welle aufgesetzt. Diese Type wird sowohl als Wechselstrom-„Aufsenpol"-, dann aber auch als Wechselstrom-„Innenpol"-Maschine gebaut. Bei letzteren rotieren — wie es auch die Figur andeutet — die Feldmagnete im Inneren des feststehenden Ankers und kann man dieselben sowohl für hohe Spannungen als auch für grofse Stromstärken bauen. Der Wechselstrom wird direkt von der feststehenden Wickelung abgenommen; der Erregerstrom wird mittels zweier kleiner Schleifringe der Multiplikation zugeführt.

Bei den Aufsenpol-Maschinen wird der Anker um die feststehenden Feldmagnete gedreht und wird diese Anordnung nur zur Erzielung von Hochspannungen verwendet. „Schuckert" erklärt, dafs beim reinen Lichtbetriebe die Leistung der Maschine dem Wattverbrauche entspricht. Beim reinen Motoren-Betriebe mit asynchronen Motoren soll die Leistung der Dynamo jener Zahl von Kilowatt entsprechen, welche von den Motoren verbraucht werden, doch mufs man zu dieser Zahl noch 30% zuschlagen.

Bei gemischtem Betriebe (Licht und Kraft) verringert sich dieser Zuschlag mit dem Überwinden des Energieverbrauches zu Leuchtzwecken.

Verschiedene Konstruktionen.

Maurice Houtin und Maurice Leblanc in Paris konstruierten eine Mehrphasen-Wechselstrom-Maschine und bewirken die Phasenverschiebung mittels Kondensatoren (siehe D. R.-Patent Nr. 63446/1890). Diese Maschine besteht aus einem festen Ringe *A A* (siehe das Schema Fig. 133), in dessen Innern eine Trommel *B B* rotiert werden kann. Jeder dieser beiden Teile, der Ring sowie die Trommel, ist mit zwei getrennten Stromkreisen versehen.

Jeder Stromkreis des Ringes ist von 2_n-Spulen, $a_1 a_2 \ldots a_n$, $a_1^1 a_2^1 \ldots a_n^1$, gebildet, welche denjenigen der Grammeschen Ringe ähnlich und längs der Peripherie regelmäfsig angeordnet sind. Die Richtung der Drahtbewickelung ändert sich beim Übergang von einer Spule zur folgenden desselben Stromkreises dergestalt, dafs ein in den Stromkreis gesendeter Strom in den Ring 2_n abwechselnd positive und negative Pole entwickelt. Die beiden Stromkreise des Ringes sind in Bezug aufeinander symmetrisch angeordnet.

Die Eintritts- und die Austrittspunkte dieser Stromkreise sind in dem Schema Fig. 133 mit den Buchstaben $e\,s$, $e'\,s'$ bezeichnet.

Jeder Stromkreis der Trommel ist von 2_n-Kupferstäben $b_1\,b_2 \ldots b_n$, $b_1{}^1\,b_2{}^1 \ldots b_n{}^1$ gebildet, welche längs der Peripherie der Trommel regelmäfsig angeordnet sind. Diese Stäbe sind so unter sich verbunden, wie das Schema Fig. 134 erkennen läfst. Die genannten Stäbe können durch ebenso viele Grammesche oder Siemenssche Spulen ersetzt werden.

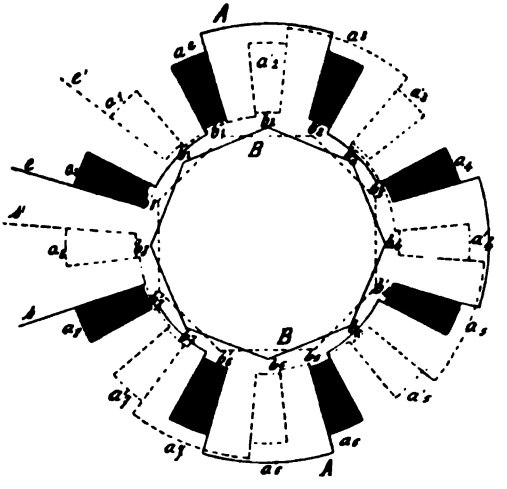


Fig. 133.

Die Eintritts- und die Austrittspunkte der beweglichen Stromkreise sind mit Scheiben in Verbindung, wie dies in Fig. 134 bei e und s angedeutet ist. Diese Scheiben sind auf die Achse aufgekeilt und auf denselben schleifen feste Reiber.

Auf diese Weise kann man jeden der beweglichen Stromkreise auf einem veränderlichen äufseren Widerstande schliefsen, welchen man zwischen die festen Reiber, die auf den Scheiben e und s schleifen, einschalten wird.

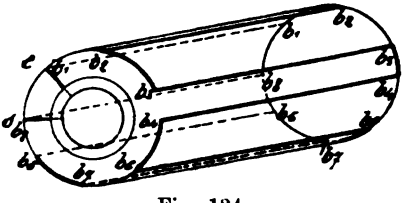


Fig. 134.

Wenn man in die beiden festen Stromkreise zwei Wechselströme von gleicher Wechselzahl, aber von solchen Schwingungen, dafs die Wellen des einen Stromes in Bezug auf diejenigen des anderen um $^1/_4$ Welle im Rückstande sind, sendet, während die beiden beweglichen Stromkreise über Widerstände geschlossen sind, wird ein treibendes Kräftepaar auf der Achse der Maschine entwickelt, welches von der Drehgeschwindigkeit der Maschine unabhängig ist.

Um diese beiden Wechselströme von derselben mittleren Stärke, aber von verschiedenen Phasen zu erhalten, wenden wir die eine oder die andere der beiden folgenden Einrichtungen an.

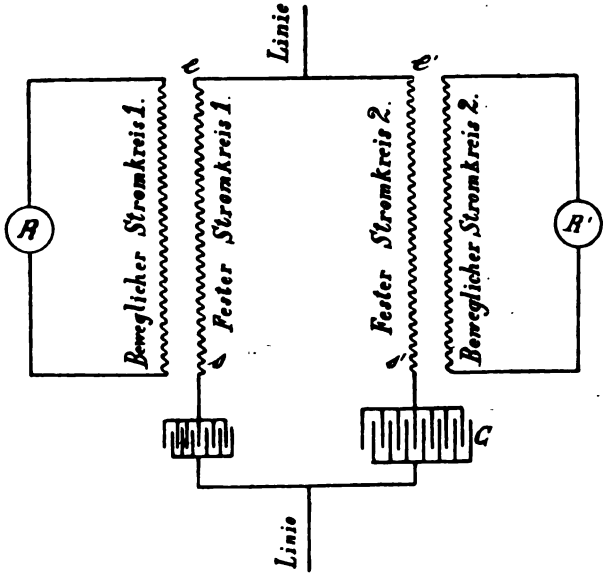


Fig. 135.

Erste Einrichtung (siehe das Schema Fig. 135): Die beiden festen Stromkreise sind im Nebenschluſs in die Linie eingeschaltet, aber jeder von ihnen ist durch einen Kondensator von passender Kapazität unterbrochen. Die Kapazität der beiden Kondensatoren ist verschieden.

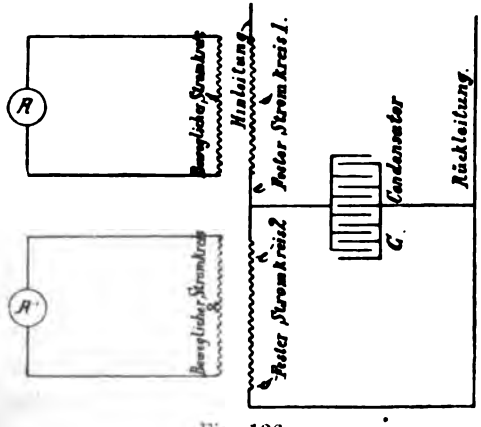


Fig. 136.

In gewissen Fällen wird es ratsam sein, in jeden Stromkreis einen Kondensator in Reihe einzuschalten. Diese beiden Kondensatoren müssen von verschiedener Kapazität sein. Die beiden beweglichen Stromkreise sind über zwei getrennte Wider-

standsregler R und R' geschlossen, deren Widerstände immer gleich sein, aber mit der Geschwindigkeit der Maschine sich ändern müssen. Diese beiden Widerstandsregler können durch eine und dieselbe Vorrichtung eingestellt werden.

Zweite Einrichtung (s. das Schema Fig. 136): Die beiden festen Stromkreise sind hintereinander in die Linie eingeschaltet. Der Strom tritt bei s in den ersten Stromkreis ein und bei e aus diesem Stromkreise aus, fließt in den zweiten Stromkreis bei e' ein und verläßt diesen Stromkreis bei s'.

Zwischen die Punkte e und e' der Hinterleitung und einen beliebigen Punkt der Rückleitung ist ein Kondensator C von passender Kapazität im Nebenschluß eingeschaltet.

Die beiden beweglichen Stromkreise sind wie im

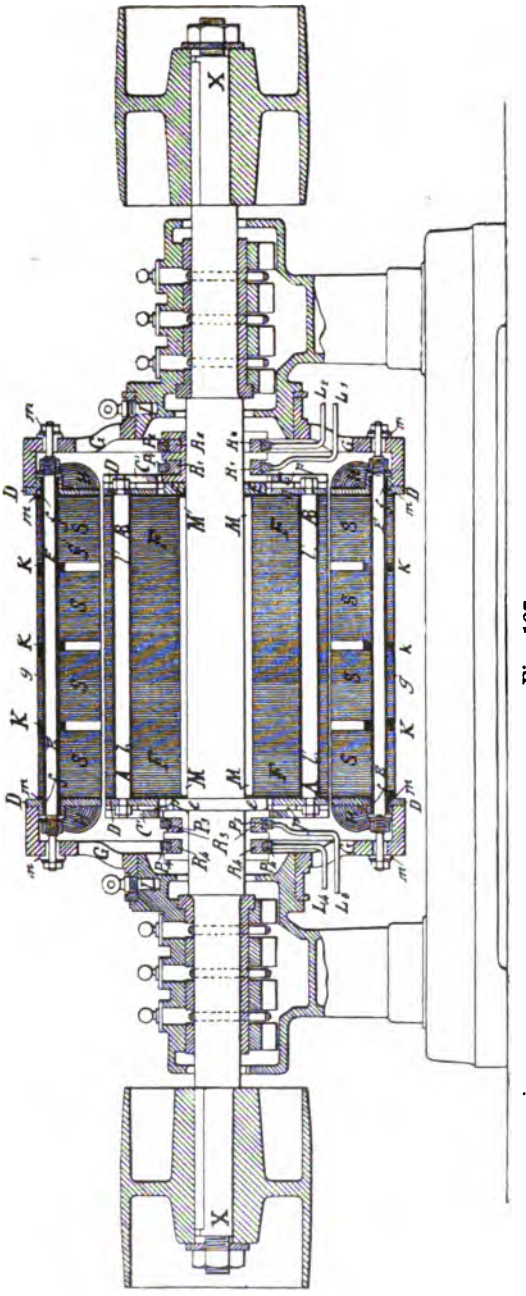


Fig. 137.

vorhergehenden Falle über zwei Widerstandsregler geschlossen, deren Widerstände veränderlich sind, aber unter sich gleich bleiben. Durch die Anwendung der einen der beiden oben beschriebenen Einrichtungen wird ein beliebiger, in die Linie gesendeter Wechselstrom in zwei Wechselströme von derselben mittleren Stärke zerlegt, deren Wellen aber einen Phasenunterschied von $^1/_4$ Welle aufweisen.

Eine Ausführungsform der auf dem eben dargelegten Grund-

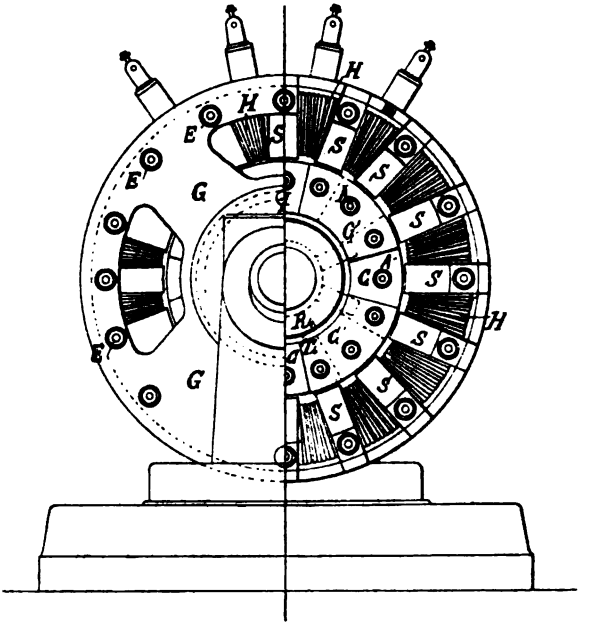


Fig. 138.

gedanken beruhenden Maschine ist in der Fig. 137, Seite 185, (ein Längsschnitt) und Fig. 138 (eine Endansicht) veranschaulicht.

Auf der Welle XX sind gleichartige Blechscheiben angeordnet, welche voneinander isoliert und, wie in Fig. 139 angegeben, ausgestanzt sind. Diese Blechscheiben sind von der Welle durch eine aus Ebonit oder einem anderen isolierenden Material bestehenden Hülse MM isoliert und zwischen zwei an der Welle angebrachten Platten ee und mittels Schrauben und Muttern EE fest zusammengepreſst.

Durch diese Scheiben gehen eine Anzahl von Kupferbolzen

AB hindurch, welche zur Bildung der beweglichen Stromkreise dienen. Diese Bolzen sind von der dieselben umgebenden Eisenmasse durch Ebonitröhren ll isoliert und gemäfs dem Schema Fig. 134 miteinander durch Kupferstücke $CCC'C'$ verbunden, welche voneinander und von der Eisenmasse durch isolierende Scheiben pp isoliert sind.

Die Eintritts- und die Austrittspunkte der beiden von diesen Bolzen gebildeten Stromkreise sind durch Kupferbänder mit vier Metallringen $R_1 R_1$, $R_2 R_2$, $R_3 R_3$, $R_4 R_4$ verbunden, welche auf

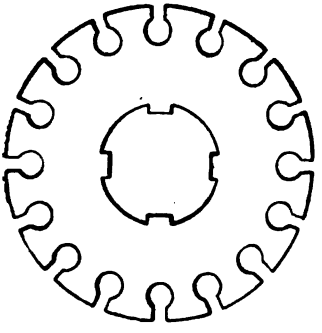


Fig. 139.

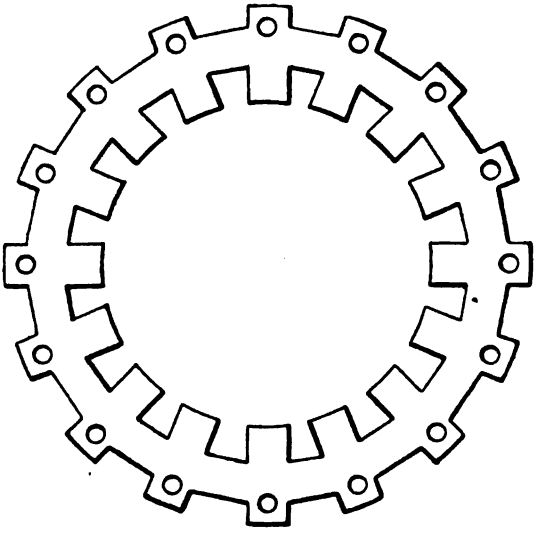


Fig. 140.

diese Welle XX aufgekeilt und von dieser sowie voneinander isoliert sind.

Auf diesen Ringen sind Metallkränze $P_1 P_1$, $P_2 P_2$, $P_3 P_3$, $P_4 P_4$ angeordnet, welche festgehalten werden und je durch eine Leitungsstange $L_1 L_2 L_3 L_4$ mit je einer von vier Klemmen verbunden sind. Die letzteren sind in Fig. 137 fortgelassen, um dieselbe nicht undeutlich zu machen.

Zwischen diese Klemmen werden die beiden Widerstandsregler eingeschaltet, welche zum richtigen Arbeiten der Maschine nötig sind.

Der feste Ring ist von einer Anzahl Blechscheiben SS gebildet, welche, wie in Fig. 140 angegeben, ausgestanzt und durch Papierscheiben voneinander isoliert sind. Sie sind miteinander durch zwei Wangen DD verbunden, welche durch isolierende Platten ff isoliert und durch Bolzen EF abgesteift sind. Diese

Bolzen sind von allen dieselben umgebenden Metallteilen durch Ebonitrohre $g\,g$ und aus Vulkanfiber bestehenden Scheiben $m\,m$ sorgfältig isoliert.

In den von den Blechscheiben gebildeten Ring sind eine gewisse Anzahl Lücken gelassen, um die Ventilation der Maschine zu erleichtern. Der Abstand der Scheibengruppen des Ringes wird durch isolierende Scheiben $K\,K$ aufrecht erhalten.

In den Ausschnitten des Ringes sind Spulen $H\,H$, Fig. 138, untergebracht, welche wie Spulen des Grammeschen Ringes gewickelt sind und die Wangen $D\,D$ umfassen.

Diese Spulen bilden die beiden festen Stromkreise, und die Eintritts- und die Austrittspunkte dieser Stromkreise sind mit Klemmen verbunden, welche in Fig. 138 dargestellt sind.

Der Ring wird von zwei Bronzeplatten $G\,G$ getragen, welche durch die Bolzen $E\,F$ gegen denselben gepreſst sind. Die Bronzeplatten ruhen auf dem inneren Ende der Lager der Welle $X\,X$ und werden durch zwei Vorstrecker $I\,I$ daran verhindert sich zu drehen.

Die Platten $G\,G$ sind mit Aussparungen versehen, um die Verbindungsstangen $L_1\,L_2\,L_3\,L_4$ hindurchzulassen und die Zirkulation der Luft durch die Maschine zu gestatten.

Die Welle der Maschine trägt aufserdem noch an jedem Ende eine Riemscheibe. Der Kondensator und der Widerstandsregler haben die bekannte Einrichtung.

Die bewegliche Trommel kann durch einen dem äufseren Ringe gleichen, aber kleineren Ring oder durch eine mit Siemensscher Bewickelung versehene Trommel ersetzt werden. In beiden Fällen mufs die Anzahl der Spulen des beweglichen Teiles immer gleich der Anzahl der Spulen des äufseren Ringes sein, und ferner müssen die Spulen der Trommel oder des inneren Ringes zwei gleiche Stromkreise bilden, welche symmetrisch angeordnet sind. Die Eintritts- und die Austrittsenden dieser beiden Stromkreise werden immer mit vier Metallringen verbunden, welche auf der Welle befestigt sind und auf welchen vier feste Reiber schleifen.

Bei der eben beschriebenen Maschine müssen die Widerstandsregler so eingestellt werden, dafs die in die induzierten Ströme eingeführten Widerstände im Augenblick des Ingangsetzens am gröfsten sind und dann gemäfs der Zunahme der Geschwindig-

keit abnehmen. Diese Bedingung ist nötig, um das treibende Kräftepaar von der Geschwindigkeit abhängig zu machen. Man kann bemerken, dafs die Wechselzahl des induzierten Wechselstromes von der Drehgeschwindigkeit der Maschine abhängt und im Augenblicke des Ingangsetzens den kleinsten Wert hat. Andererseits ist bekannt, dafs ein Leiter von grofsem Querschnitt dem Durchgange eines Wechselstromes einen um so gröfseren Widerstand darbietet, je kürzer die Periode des Wechselstromes ist, und dafs diese Erscheinung sich besonders in den eisernen Leitern wegen deren grofser magnetischer Durchlässigkeit bemerklich macht. Es ergiebt sich daraus, dafs, wenn wir den induzierten Stromkreis der beschriebenen Maschine durch einen eisernen Zylinder ersetzen, die in der Masse des letzteren induzierten Ströme einen um so höheren Widerstand überwinden

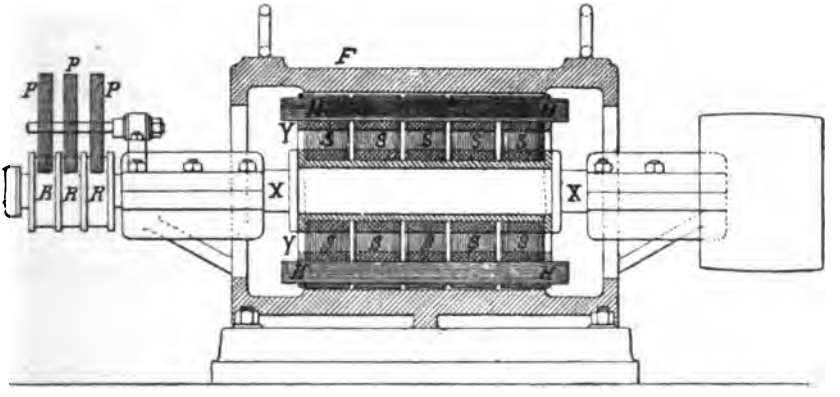


Fig. 141.

müssen, je langsamer die Maschine geht. Unter diesen Bedingungen wird die Beständigkeit der Treibkraft sehr merklich gesichert.

Es ist alsdann aber viel einfacher, den Anker festzumachen und mit dem Maschinengestelle aus einem Stücke zu gieſsen, wie in Fig. 141 im Längsschnitte dargestellt ist.

Bei dieser Maschine ist der Feldmagnet *Y* ähnlich dem Anker der zuvor beschriebenen Maschine gebildet, und sind die Kupferbolzen durch einen Draht ersetzt, dessen Querschnitt gemäfs der Stärke des Stromes, welcher die Maschine speisen soll, mehr oder weniger grofs ist. Die Art der Bewickelung ist dieselbe wie im vorigen Falle.

Bei der Maschine (Fig. 141) sind die Stromabnehmescheiben *R* und die festen Bürsten *P* aufserhalb des Gestelles angeordnet. Es sind drei Scheiben und drei Bürsten vorhanden; von diesen Scheiben gehen drei isolierte Drähte durch die Welle *X*, von welchen Drähten der erste mit dem Anfange des ersten beweglichen Stromkreises, der zweite mit dem Anfange des zweiten beweglichen Stromkreises und der dritte mit den Enden der beiden beweglichen Stromkreise verbunden ist. Der letztere Draht dient demnach als gemeinsame Rückleitung. Schliefslich sei erwähnt, dafs gewisse Vorrichtungen dieselben Eigenschaften wie die Kondensatoren besitzen und die letzteren bei dem Gebrauche, welchen wir davon machen wollen, ersetzen können. (Elektrische Sammler und die thermoelektrischen Batterien.)

Es ist bekannt, dafs, wenn ein elektrischer Sammler nur eine sehr schwache Ladung erhalten hat, die elektromotorische Kraft desselben merklich proportional der Elektrizitätsmenge ist, welche dadurch aufgespeichert wurde. Wenn wir unsere Kondensatoren also durch elektrische Sammler ersetzen, so gelangen wir zu demselben Ergebnis.

Es ist ferner bekannt, dafs, wenn man einen Strom in eine thermoelektrische Batterie leitet, der Durchgang dieses Stromes Temperaturdifferenzen zwischen den verschiedenen Lötstellen veranlafst, und dafs, wenn man die Batterie auf sich selbst schliefst, dieselben einen dem ersten engegengesetzt gerichteten Strom erzeugen.

Johannes Sohlman in Frederiksham (Finland) hat eine elektrische Maschine zur Erzeugung von gewöhnlichen oder mehrphasigen Wechselströmen gebaut, mittels welcher je nach Bedürfnis Zweileitersysteme für gewöhnliche Wechselströme, oder aber Mehrleitersysteme für Drehströme mit verschiedener Phasenanzahl erzeugt werden können. Dieser Zweck wird dadurch erreicht, dafs man (für den Fall einer Innenpolmaschine) zwei getrennte, gleichgestaltete Systeme von sternförmig angeordneten Polschuhen in einiger Entfernung voneinander auf einer gemeinsamen Welle anbringt und um die letztere einen erregenden Gleichstrom in der Weise herumleitet, dafs sämtliche Pole auf der einen Seite Nordpole, auf der anderen dagegen Südpole werden. Diesen beiden eine gleiche Anzahl von Polen aufweisenden Systemen werden zwei Ankerringe gegenübergestellt, deren

Polzahl untereinander gleich und auch gleich (oder ein vielfaches) derjenigen der inneren Polsysteme ist. Die beiden Ankerringe werden verstellbar in ein gleichzeitig den Schluſs der Kraftlinie vermittelndes eisernes Gehäuse eingesetzt und können derart gestellt werden, daſs sich die Pole der Ankerringe untereinander (in der Richtung der Maschinenachse gesehen) vollkommen decken und demnach sämtlich in derselben relativen Lage zu den Polschuhen der inneren Polsysteme liegen. In diesem Falle werden natürlich sämtliche Ankerspulen zu derselben Zeit in gleichem Sinne und gleich stark erregt, so daſs ein gewöhnlicher Wechselstrom entsteht. Wichtig ist hierbei, daſs die Pole des einen Ankerringes, nämlich desjenigen, welcher den inneren, sternförmig angeordneten Nordpolen gegenüber liegt, Südpole, während die anderen Nordpole sind, so daſs demnach beim Vorbeidrehen der inneren Polschuhe an den Ankerspulen nicht ein Ummagnetisieren, sondern eine abwechselnd stärkere und schwächere, die Induktion bedingende Erregung stattfindet.

Werden dagegen die Ankerringe derart gegeneinander verstellt, daſs die einzelnen Spulen sich — in der Richtung der Maschinenachse gesehen — nicht decken, so ist die Gröſse und der Sinn der elektrischen Induktion in sämtlichen Spulen ein und desselben Ankerringes derselbe, während die Stärke und Richtung des den beiden verschiedenen Ankerringen entnommenen Stromes zu gleichen Zeiten verschieden ist, was darin seinen Grund hat, daſs in diesem Falle die Spulen des einen Ankerringes eine andere relative Lage zu den ihnen gegenüberliegenden Magnetpolen bei der Drehung der letzteren einnehmen als die Spulen des anderen Ankerringes zu den dazugehörigen Polschuhen. Während beispielsweise an der einen Seite der Maschine die Spulen und Feldmagnete in der Annäherung aneinander begriffen sind, können dieselben sich an der anderen Seite wieder von einander entfernen und wenn hierbei in einem Ankerringe ein negativer Strom entstehen würde, würde im anderen bereits ein positiver vorhanden sein. Es entstehen auf diese Weise Wechselströme von gegeneinander verschobener Phase und die Gröſse dieser Phasenverschiebung ist abhängig von der Verschiebung der Ankerringe gegeneinander. Beträgt beispielsweise der Winkel, welchen die Mittelachsen zweier benachbarter Magnetpole miteinander bilden, a^0, so wird bei einer Verschiebung der beiden

Ankerringe um $^1/_2\,a^0$, $^1/_3\,a^0$, $^1/_4\,a^0$ u. s. w. auch die Phasenverschiebung der beiden Wechselströme gegeneinander $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ u. s. w. sein.

Verbindet man bei einem Phasenunterschiede von $^1/_3 = 120^0$ zwei Leitungen mit einer gemeinsamen Klemme, so ergiebt sich, wie weiter unten erklärt, ein Drehstrom für Dreileiter-Systeme. Herr J. Sohlmann beschreibt seine Maschine in der bezüglichen Patentschrift (62 438, 1891) auf folgende Weise:

Die Fig. 142 zeigt eine Vorderansicht einer nach diesen Ideen gebauten Maschine, und zwar sind auf der rechten und linken Seite der Mittellinie je eine besondere Form von Ankerpolen und Feldmagneten dargestellt, während die nebenstehende Fig. 143 einen Schnitt nach der Linie $x - x$ der Fig. 142 veranschaulicht, wobei die Abmessungen der Pole nach der einen oder anderen Art gewählt sein können.

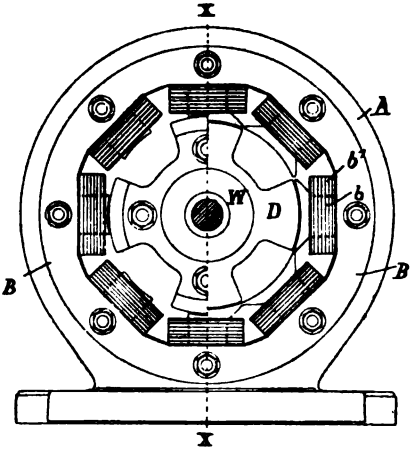


Fig. 142.

Mit *A* ist der äufsere gufseiserne Mantel der Maschine bezeichnet, in welchem an beiden Seiten die ringförmigen, aus Eisenblech zusammengesetzten Anker *B* durch geeignete Verschraubungen beliebig verstellbar eingesetzt sind. Auf den einzelnen Polen *b* dieser Ankerringe befinden sich die Induktionswickelungen *b'*, deren freie Enden zu den Polklemmen 1, 2, 3 an der Aufsenseite des Mantels *A* geführt sind (vorausgesetzt, dafs ein zwei- oder dreiphasiger und durch drei Leitungen *I*, *II*, *III* zu verteilender Drehstrom erzeugt werden soll).

Die Maschinenwelle *W* trägt innerhalb des Mantels *A* zwei Systeme *D* von aus einzelnen Blechen zusammengesetzten (oder massiven) Polschuhen, welche zweckmäfsig in ihrer Breite so bemessen werden, dafs sie gleichzeitig die Hälfte von zwei Ankerpolen decken können. Der mittlere Teil der Welle *W* ist, um einen möglichst geringen magnetischen Widerstand zu erhalten, verstärkt und trägt die Erregerwickelung *C*, welche, wenn die

Maschine besonders erregt wird, feststeht, während dieselbe, wenn die Maschine selbsterregend (mit Stromwender für die Erregerspule) gebaut wird, sich mit der Welle dreht.

Da nun beide Ankerringe *B* sowie auch die beiden Schuhe *D* eine gleiche Anzahl von Polen besitzen, so ist ersichtlich, dafs durch gegenseitige Verstellung entweder der Ankerpolschuhe oder der Feldmagnetpolschuhe gegeneinander mit der vorstehend beschriebenen Maschine entweder ein gewöhnlicher oder ein zweiphasiger Wechselstrom erzeugt werden kann. Stellt man z. B.

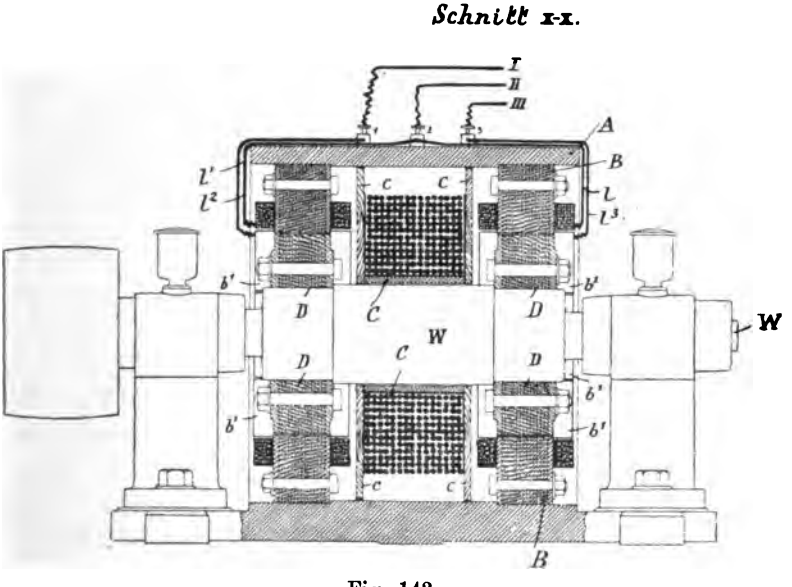


Fig. 143.

die beiden Ankerringe *B* derart ein, dafs ihre Polschuhe, in der Richtung der Maschinenachse gesehen, sich genau decken, und befestigt man ferner die Schuhe *D* derart, dafs auch ihre Pole in eine Linie zu liegen kommen, so werden beide Ringe gewissermaafsen wie ein Ankerring wirken und einen gewöhnlichen Wechselstrom erzeugen. In diesem Falle können die beiden Anker entweder parallel oder hintereinander geschaltet werden. Verdreht man dagegen entweder die Ankerringe *B* etwas gegeneinander, während die Schuhe *D* in der vorigen Lage erhalten bleiben, oder aber beläfst man die Ankerringe in der vorigen Lage und verstellt die Schuhe *D* gegeneinander, so wird nun-

mehr, wenn man die freien Enden $l\,l'$ an die Polklemme 2, die Leitungen $l^2\,l^3$ dagegen an die Klemmen 1 bezw. 3 anschliefst, ein zweiphasiger Wechselstrom erzeugt werden. Wenn man die Fernleitungen I und II, II und III durch Zweigleitungen miteinander verbindet, so entstehen in diesen Zweigen Wechselströme von verschiedenen Phasen.

Verbindet man aber im Verteilungsnetz I mit II, II mit III und noch dazu I mit III, so wird hierdurch der zweiphasige Strom in drei Ströme von verschiedenen Phasen gespalten. Ist der Phasenunterschied des zweiphasigen Stromes 120°, so wird der Phasenunterschied der drei Ströme in den Zweigleitungen 60° und alle drei Ströme werden untereinander von gleicher Intensität. Bei Kraftübertragungen mit dreiphasigem Drehstrome werden deshalb die Ringe so gestellt, dafs der Phasenunterschied der elektromotorischen Kraft in den beiden Ringen 120° beträgt. Die Anzahl der Ankerringe B und ebenso die Anzahl der Schuhe D kann beliebig vermehrt werden, wenn Wechselströme mit mehr als drei Phasen erzeugt werden sollen.

Die Unveränderlichkeit des magnetischen Widerstandes wird dadurch erreicht, dafs die Magnetpole so breit sind, dafs hierdurch die Übergangsfläche des Luftzwischenraumes gleichbleibend wird.

Man kann übrigens die Unveränderlichkeit des magnetischen Widerstandes noch zweckmäfsig dadurch erhöhen, dafs man die Polschuhe der Ankerringe B in der (siehe Fig. 142 rechts unten) angedeuteten Weise miteinander verbindet. In diesem Falle ist die Form der Feldmagnetpole von untergeordneter Bedeutung. Aufserdem ist es auch möglich, die Erregerwickelung C anstatt auf der Welle W auf den Polschuhen selbst anzubringen und kann man diese letzteren (also die Ringe D) allenfalls auch als Anker benutzen und dann die Erregerspule auf der Welle oder auf dem Pole des Ringes B befestigen. In diesem Falle müfsten natürlich besondere Schleifringe vorhanden sein, mittels deren der Strom von der Induktionswickelung abgenommen werden kann.

Die Ankerpole können auch nach beiden Seiten gerichtet werden. In diesem Falle können die beiden Ankerringe unmittelbar miteinander verbunden sein und man hat alsdann eine Maschine mit nur einem Ringe, aber mit zwei verschiedenen Polkränzen.

Das Bestreben, Wechselstromerzeuger derart zu bauen, dafs sowohl die erregende wie die erregte Wickelung auf dem feststehenden Teil der Maschine angeordnet sein und aus einfachen ringförmigen Spulen bestehen kann, hat zu denjenigen Anordnungen geführt, bei denen die induzierende Wirkung lediglich durch abwechselndes Schliefsen und Öffnen der Feldmagnete hervorgebracht wird. Es zeigte sich indessen dabei immer der Übelstand, dafs die in dem Erregerstromkreise erzeugten schädlichen Wirkungen ebenso grofs ausfielen, wie die im Wechselstromkreis angestrebten, zur Ausnutzung bestimmten. Dieser Übelstand hat dazu geführt, dafs man früher zwischen den eigentlichen Feldmagneten noch besondere Schlufsstücke aus Eisen anordnete, welche zwar die Erregerwickelung, nicht aber die Ankerwickelung umfafsten. Diese Schlufsstücke werden durch die Bewegung des sich drehenden Teiles der Maschine ebenso abwechselnd geschlossen und geöffnet wie die eigentlichen Feldmagnete, und da sie mit demselben Erregerstrom und mit der gleichen Anzahl Windungen erregt werden wie diese, so erzeugen die Schliefsungen und Öffnungen ebenso grofse sinusartige elektromotorische Kräfte in den erregenden Windungen wie die Schliefsungen und Öffnungen der eigentlichen Feldmagnete. Aber diese elektromotorischen Kräfte sind der Lage jener Schlufsstücke entsprechend um eine halbe Periode gegenüber den in den Feldmagneten erzeugten Kräften der Zeit nach verschoben, und die Wirkung jener Kräfte wird daher in der Erregerwickelung aufgehoben und kommt nur in der Ankerwickelung zur Geltung.

Die Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vormals L. Schwartzkopff in Berlin (Siehe D. R.-Patent Nr. 74439/1893) hat eine Konstruktion versucht, um die Anwendung dieser Schlufsstücke überflüssig zu machen. Dies wird dadurch erreicht, dafs die Feldmagnete nicht wie bisher in einer Ebene angeordnet uud von einer einzigen Multiplikations-Spule, sondern in zwei Ebenen und dementsprechend von zwei Spulen erregt werden. Man braucht nun blos dafür zu sorgen, dafs die Schliefsungs- und Öffnungsphasen beider Systeme von Feldmagneten um eine halbe Periode gegeneinander verschoben sind, so werden die in der Erregerwickelung des einen Systems erzeugten sinusartigen elektromotorischen Kräfte die in der Erregerwickelung

des anderen erzeugten gleichen Kräfte aufheben, so dafs keine schädlichen Schwankungen des Erregerstromes entstehen. Jedes System von Feldmagneten wird mit einer eigenen Ankerwickelung versehen, und in diesen Ankerwickelungen werden daher ebenfalls um eine halbe Periode gegeneinander verschobene elektromotorische Kräfte erzeugt, da aber die beiden Ankerwickelungen getrennt sind, können sie derart hinter- oder nebeneinander geschaltet werden, dafs die beiden Kräfte sich in ihnen nicht aufheben, sondern addieren. Auf diese Weise wird es möglich, das gesamte in der Maschine enthaltene Eisen nutzbar zu machen.

Die Fig. 144 und 145 stellen die sich aus dem Gesagten er-

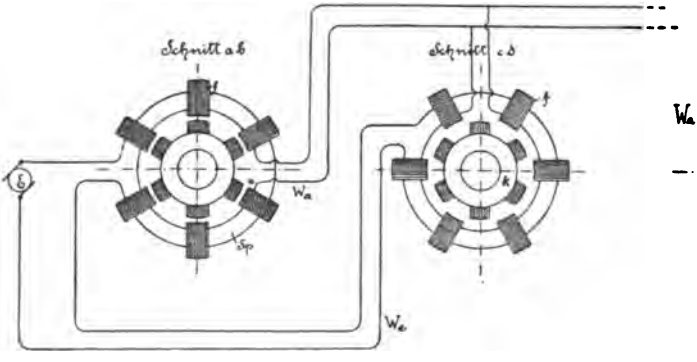


Fig. 144.

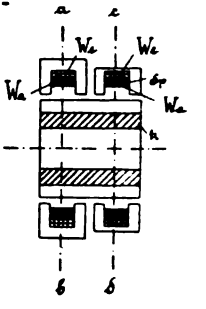


Fig. 145.

gebende Anordnung einer Wechselstrom-Maschine rein schematisch dar, und zwar zeigt Fig. 144 einen Längsschnitt durch die Maschine, während Fig. 145 und 146 zwei Querschnitte nach den Linien $a - b$ und $c - d$ der Fig. 144 darstellt. ff, Fig. 144, sind hufeisenförmige Eisenkerne, welche auf den ringförmigen Wickelungen $Sp\ Sp$ reiten. Der sich drehende Teil der Maschine besteht aus einem Kranz k aus unmagnetisierbaren Stoff, an dessen Umfang eine der Anzahl der Feldmagnete f entsprechende Anzahl von Eisenstücken befestigt ist. Letztere müssen bei der Drehung des Kranzes k um seine Achse die Feldmagnete f abwechselnd schliefsen und öffnen. Die Spulen Sp enthalten nebeneinander sowohl die Erregerwindungen We wie die Ankerwindungen Wa. Die beiden Erregerwickelungen sind hintereinander geschaltet, so dafs die darin erzeugten sinusoidalen elektromagnetischen Kräfte sich gegenseitig aufheben, weil die n-Feldmagnete des Querschnittes $c - d$ gegen die

n-Feldmagnete des Querschnittes $a - b$ um $\frac{1}{n}$ des Umfanges versetzt sind, somit elektromotorische Kräfte erzeugen, die um eine halbe Periode gegen die im System $a - b$ erzeugten verschoben sind. Die beiden Ankerwickelungen sind beispielsweise nebeneinander und in solcher Weise geschaltet, dafs die darin entwickelten elektromotorischen Kräfte sich in jedem Augenblick addieren müssen. Das entwickelte System läfst sich verallgemeinern, indem man, anstatt zwei Systeme von Feldmagneten in zwei Ebenen anzuordnen, deren Schliefsungs- und Öffnungsphasen nur eine halbe Periode gegeneinander verschoben sind, n-Systeme von Feldmagneten in n-Ebenen anordnet und die entsprechenden Phasen ihre Schliefsungen um je $\frac{1}{n}$ der Periode gegeneinander verschiebt. Man erhält alsdann ebenfalls keine Rückwirkung auf den Erreger, weil nach den Gesetzen des Mehrphasenstromes die Summe von n um je $\frac{1}{n}$ ihrer Periode gegeneinander verschobenen Sinus gleich Null ist. Die in den Ankerwickelungen erhaltenen n um je $\frac{1}{n}$ ihrer Periode gegeneinander verschobenen Wechselströme wird man alsdann selbstverständlich nicht hintereinander schalten, sondern wird sie getrennt verwenden.

Anstatt, wie in Fig. 145 angegeben, je eine Erregerwickelung und eine Induktionswickelung von einzelnen gegeneinander versetzten hufeisenförmigen Eisenkernen dreiseitig umfassen zu lassen, kann man diese Kerne auch in der Weise übereinander greifen lassen, wie dies in der Fig. 146 dargestellt ist, und kann die Erregerwickelung in den mittleren, die Induktionswickelung hingegen in die äufseren von den Schenkeln der ⊔-förmigen Eisenkerne gebildeten Räume verlegen. Umgekehrt kann man auch, wie in Fig. 147 (Seite 198) dargestellt, die ⊔-förmigen Eisenkerne in parallel zur Maschinenachse verlaufenden Linien nebeneinander anordnen und

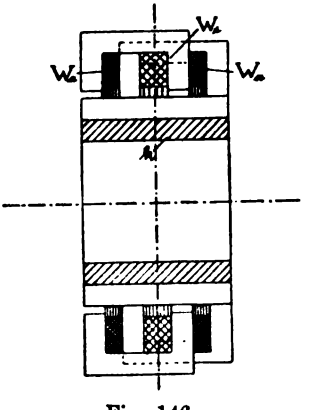


Fig. 146.

die am Anker angebrachten, gegeneinander versetzten Schlufsstücke übereinander greifen lassen, so dafs die Kraftlinien die durch Pfeile angedeuteten Wege nehmen.

Es ist gleichgiltig, ob die Verschiebung der Schliefsungen und Öffnungen der Feldmagnete durch Bewegen von Schlufsstücken gegenüber feststehenden Magneten- oder durch Bewegen von Magneten gegenüber feststehenden Schlufsstücken erzielt wird. Beide Wickelungen können entweder im bewegten oder im feststehenden Teil untergebracht werden, oder die eine im bewegten, die andere im feststehenden, je nachdem die eine oder andere Anordnung sich den jeweiligen Bedürfnissen besser anpafst. Es ist ferner gleichgiltig, ob die Verschiebung der Schliefsungs- und Öffnungsphasen durch Versetzung der auf dem feststehenden oder dem bewegten Teile angebrachten Eisenteile herbeigeführt wird.

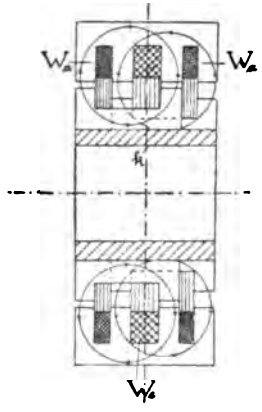


Fig. 147.

George Frederick Dickmann in Chicago konstruierte eine elektrische Maschine mit besonderer, durch die Hauptwickelung induzierter Nebenwickelung auf dem Anker, welche bezweckt,

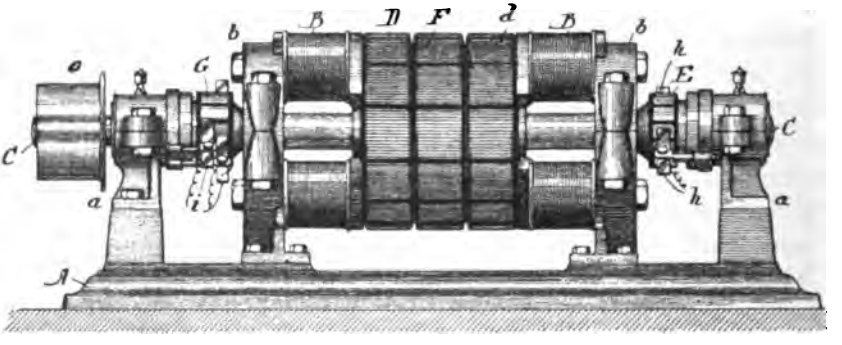


Fig. 148.

die elektrischen Impulse, welche durch magnetische Induktion beim inneren Stromkreise in der Ankerspule der gewöhnlichen Dynamo-Maschine hervorgerufen werden, dazu auszunutzen, um daselbst in einer zu diesem Zwecke angeordneten Sekundärspule einen besonderen zweiten elektrischen Strom hervorzurufen, der von

dort aus in den äufseren Stromkreis geleitet und ausgenutzt werden kann. Die Fig. 148 veranschaulicht eine solche elektrische Maschine in der Vorderansicht, während Fig. 149 eine

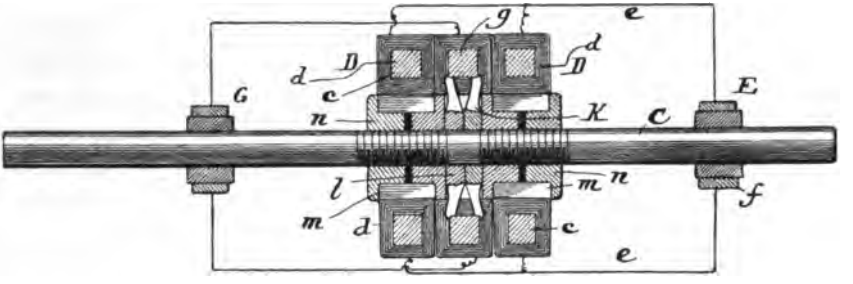


Fig. 149.

Einzelheit der Maschine im Längenschnitt zeigt. Fig. 150 ist eine analytische Tabelle, welche die während der Umdrehung bei verschiedenen aufeinander folgenden Stellungen eintretenden elektrischen Wirkungen und Rückwirkungen zur Anschauung bringt. Fig. *1* bis *4*, Tafel VII, sind schematische Darstellungen, welche die elektrische Wirkung und Rückwirkung zwischen der primären

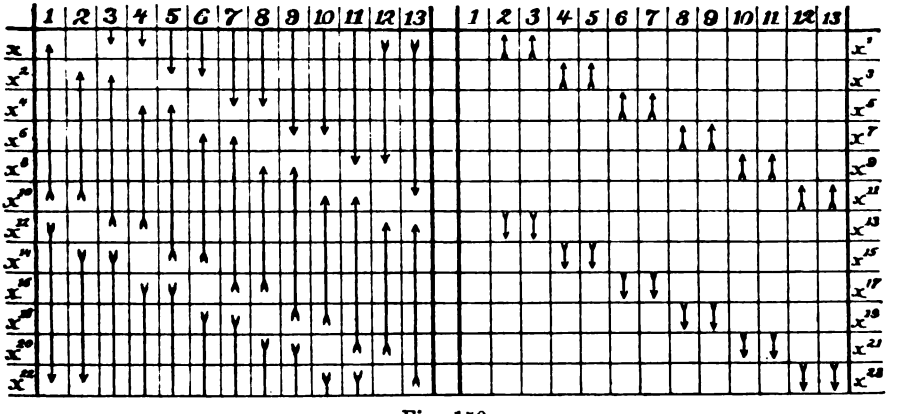


Fig. 150.

Ankerspule und der Sekundärspule bei einzelnen der aufeinander folgenden Stellungen versinnbildlichen.

Bei der als Beispiel gewählten Ausführungsform sind die den Gegenstand der Erfindung bildenden Neuerungen in ihrer Anwendung auf eine nach Art der gewöhnlichen Grammeschen

eingerichteten Dynamo-Maschine gezeigt, welch letztere in nachstehend beschriebener Weise so umgeändert ist, dafs dadurch die Erzeugung des oben erwähnten zweiten Stromes gesichert ist.

In Lagern der auf der Grundplatte *A* sich erhebenden Ständer *a* ruht die von der Riemenscheibe *o* aus in Umdrehung versetzbare Welle *C*. Die ebenfalls an der Grundplatte befestigten Ständer *b* bilden einen Teil der daran seitlich hervorstehenden Elektromagnete *B*, deren einander gegenüberliegende Enden gleichnamige Pole darstellen. Jeder der Feldmagnete *B* ist mit einem Anker *D* ausgestattet, der aus einem zweckmäfsig von Gufseisen oder Eisendraht mit darüber gewickeltem isolierten Kupferdraht oder Kupferstreifen angefertigten Kern *c* besteht. Vollständig um diesen Kern herum ist in bekannter Weise die Spule *d* gewickelt, welche aber in mehrere gesonderte Einzelabteilungen zerfällt, die an nebeneinander liegenden Enden miteinander verbunden sind, so dafs die ganze Reihe eine ununterbrochene Schleife darstellt. Von jeder solchen Verbindungsstelle aus führt ein Draht *e* nach einem entsprechenden Steg *f* des isolierten Stromwenders *E*. Mit den gleichen Stegen sind die entsprechenden Abteilungen des zweiten Ankers bei der hier als Beispiel angenommenen Doppelankeranordnung durch die Drähte *e* verbunden.

Zwischen den beiden Ankern *D* und dicht daran anschliefsend ist die Sekundärspule *F* untergebracht. Ihr Kern besteht zweckmäfsig aus Holz oder gleichwertigem anderen, nicht magnetischen Stoff mit darum gewickeltem isolierten (Kupfer-) Draht oder Streifen, der ebenfalls in mehreren an den einander benachbarten Enden durch Schleifen verbundene Einzelabteilungen zerlegt ist. Diese entsprechen genau den einzelnen, ihnen gegenüberliegenden Abteilungen der Anker *D* und sind an ihren Schleifen an die einzelnen Stege eines besonderen Stromwenders *G* elektrisch angeschlossen. Die Stege der Stromwender *E* und *G* entsprechen ihrer Anzahl nach genau den Abteilungen der Spulen des Ankers einerseits und denjenigen der Sekundärspule andererseits. Die Stromwenderbürsten *h* für die Anker sind in der gewöhnlichen Weise nach dem Durchmesser des Stromwenders gestellt. Für die Sekundärspule *F* sind zwei Paar Bürsten *i* vorgesehen, von denen das eine Paar (im radialen Sinne) seitlich nahe den Ankerbürsten *h* angeordnet und von diesen nur um die Hälfte der Oberfläche eines Stromwendersteges entfernt, so zwar, dafs, wenn die

Bürste *h* zwei benachbarte Stromwenderstege überbrückt, das Bürstenpaar *i* sich auf der Mitte des nächsten Steges befindet.

Der Sekundärspulenkern *g* wird von den Speichen *K* der nebeneinander auf der Welle *C* aufgekeilten Naben *l* getragen, während die Anker *D* von den Keilblöcken *m* und Scheiben *n* gehalten werden. Letztere sind auf der Welle *C* aufgeschraubt, um daran möglichst genau so gestellt werden zu können, dafs ihre Spulenabteilungen sich genau gegenüber den entsprechenden Abteilungen der Sekundärspule *F* befinden und die Windungen der Anker- und der Sekundärspule im wesentlichen einander gegenüber und durchweg parallel stehen, damit die richtige Induktionswirkung gesichert ist.

Die Welle *C* nimmt bei ihrer Umdrehung die beiden Anker *D* und die Sekundärspule *F*, sowie die dazu gehörigen Stromwender *E* und *G* mit. Der magnetische Stromkreis wird in bekannter Weise zwischen den Feldmagneten *B* und den Ankerkernen *c* hervorgerufen. Bei fortgesetzter Drehung wird der magnetische Strom fortwährend von den Windungen der Anker *D* durchschnitten und infolge der magnetischen Induktion im Nord- und Südfelde werden dadurch gleichzeitige elektrische Impulse von entgegengesetzter Richtung darin hervorgerufen, die durch die Stromwenderbürsten *h* im äufseren Stromkreise eine fortwährend sich gleichbleibende Strömungsrichtung erhalten. Während der einen Hälfte ihrer Fortbewegung befindet sich jede einzelne Spulenabteilung im nördlichen und während der anderen Hälfte im südlichen magnetischen Felde. Die Stromwenderbürsten *h* stehen an den Grenzen des Feldes, d. h. am neutralen Punkte, und die einzelnen Abteilungen treten vom einen Felde zum anderen an der Berührungsstelle der Bürste mit dem Stromwender über. In gleicher Weise, wie die eine Bürste auf eine bestimmte Abteilung wirkt, wirkt gleichzeitig die andere Bürste auf die (in der Richtung des Durchmessers) entgegengesetzte Abteilung, aber im umgekehrten Sinne, d. h. zwei einander gegenüber befindliche Abteilungen der Ankerspule ändern gleichzeitig ihre Beziehung zum magnetischen Felde und damit zugleich auch ihren elektrischen Zustand. Diese Änderung tritt indessen nicht augenblicklich ein, denn in dem Augenblicke, in welchem die Bürste mit dem der betreffenden Abteilung entsprechenden Stege in Berührung gelangt, verbindet sie noch dieser Steg mit dem ihm benachbarten, welcher

im Begriffe ist, zurückzuweichen. In dieser Stellung der Bürste leitet dieselbe den elektrischen Strom an dieser Abteilung vorbei, d. h. sie schaltet letztere aus und macht dieselbe neutral, indem sie die betreffende Abteilung kurz schliefst. Im nächsten Augenblick befindet sich die Bürste alsdann ausschliefslich nur mit dem einen Stege in Berührung, so dafs sich damit die entsprechende Abteilung vollkommen im neuen Felde befindet und der Durchflufs des elektrischen Stromes durch dieselbe von neuem, jedoch in entgegengesetzter Richtung zu derjenigen stattfindet, in welcher dieser Durchflufs stattfand, als die betreffende Abteilung sich noch unter dem Einflusse des entgegengesetzten Magnetfeldes befand. Es hat also zuerst eine Unterbrechung und dann eine Umkehrung des elektrischen Stromes in bezw. durch die betreffende Abteilung stattgefunden. Diese beiden Änderungen rufen sekundäre Stromstöfse von gleicher Richtung in einem entsprechend parallel angeordneten sekundären Leiter hervor, welcher der Induktionswickelung ausgesetzt ist. Dieselben Vorgänge, welche hinsichtlich der Abteilung im nördlichen Felde stattfinden, treten auch gleichzeitig im entgegengesetzten Sinne in der der vorigen gegenüberliegenden Abteilung im südlichen Felde auf. Die Induktionswirkungen in beiden Feldern sind also (ihrer Richtung nach) einander genau entgegengesetzte. Dieser Umstand wird nun in der Weise ausgenutzt, dafs man an den bereits bezeichneten Stellen einen Sekundärdraht parallel anordnet und dadurch den induktiven Einflufs der Ankerspulenabteilungen, wie dieser sich beim Übergange der Abteilungen in die Überbrückungsstellung und aus dieser heraus äufsert, in nachstehend beschriebener Weise verwendet. Da die in den sekundären Leitern in den beiden Feldern hervorgerufenen sekundären Impulse gleichzeitig und in entgegengesetztem Sinne, also in gleicher Weise auftreten. wie die durch magnetische Induktion in der Ankerspule hervorgerufenen Impulse, so bedient man sich auch ähnlicher Mittel, um die auf elektrischem Wege induzierten Ströme so nach aufsen zu schaffen, dafs sie dort im äufseren Stromkreise als ein Strom von gleichbleibender Richtung erscheinen.

In den schematischen Darstellungen Fig. 1 bis 4 Tafel VII ist nur einer der Anker gezeichnet, der die bekannte Form hat und von der Sekundärspule umgeben ist. Die beiderseitigen Spulenabteilungen liegen einander parallel und gegenüber, und bilden

bei jeder der beiden Spulen eine ununterbrochene Schleife. Jeder Schleifendraht ist für sich mit einem besonderen Stege des Stromwenders E bezw. G verbunden. Die einander gegenüber befindlichen Stromwenderbürsten des Ankers sind in bekannter Weise nach dem Durchmesser des Stromwenders gerichtet, während die beiden Bürstenpaare für die Sekundärspule in radialem Sinne seitlich zu den Ankerbürsten und um einen Stromwendersteg von einander entfernt angeordnet sind, so dafs sich die Ankerbürste ihrer Stellung nach in der Mitte dazwischen befindet.

Der Einfachheit halber ist, wie bereits bemerkt, nur ein Anker gezeigt, da ja bei Anwendung zweier Anker die Änderungen in einem genau so wie im anderen stattfinden. Obgleich bei Anwendung zweier Anker, statt nur eines einzigen, die Gesamtsumme der elektromotorischen Kräfte zwischen den Ankern verteilt wird, so wird doch auch der Widerstand im gleichen Verhältnis verringert und die Kapazität verdoppelt, so dafs schliefslich die Leistung in Watt im wesentlichen dieselbe bleibt. Der einzige Nachteil der Doppelanordnung besteht demnach in der Erhöhung des Herstellungspreises um den Wert des zweiten Ankers.

Erste Stellung: Wenn die Einzelteile der Maschine sich in der in Fig. 1 Tafel VII veranschaulichten Stellung befinden, so tritt der in der Ankerspule durch magnetische Induktion hervorgerufene elektrische Strom (wie gezeigt) durch die positive Bürste h am Stromwenderdurchmesser hindurch und gelangt durch den Draht v in den äufseren Stromkreis, speist dort etwa eine Sammelbatterie X und geht durch den Draht v' und die negative Bürste h nach der anderen Seite der Spule. Hierbei befinden sich sämtliche Spulenabteilungen des Ankers im Stromkreise, indem jede der Bürsten sich mit nur einem Stromwenderstege in Berührung befindet. Es findet also keine Induktionswirkung statt, und die Sekundärspule verhält sich durchweg vollständig neutral, wie in der Zeichnung durch die schwache Linie dieser Spule angedeutet ist.

Zweite Stellung (Fig. 2 Tafel VII): Die zum Anker gehörigen Stromwenderbürsten befinden sich in derjenigen Stellung, bei welcher sie den Zwischenraum zweier benachbarter Stege überbrücken und diese miteinander verbinden. Hierdurch wird die Spulenabteilung x kurzgeschlossen, welche demjenigen Stege entspricht, der soeben mit der Bürste in Berührung gelangt ist. Durch diese Unterbrechung des (—>) Stromes in der Abteilung x wird

diese induktiv wirksam und erregt dadurch die ihr gegenüber befindliche Abteilung x' der Sekundärspule. Der dadurch in x' hervorgerufene sekundäre Impuls erhält die gleiche Richtung (—>), wie der in der Abteilung x unmittelbar vorher unterbrochene Strom sie gehabt hat. Gleichzeitig mit x ist nun aber auch die (im Sinne des Kreisdurchmessers) unmittelbar gegenüberliegende Abteilung x^{12} der Ankerspule durch die zweite Ankerbürste ausgeschaltet worden. Da der elektrische Strom in x^{12} die entgegengesetzte Richtung (<—) gegenüber demjenigen in x hat, so erhält dadurch auch der sekundäre Impuls, welcher nunmehr in der x^{12} gegenüberliegenden Abteilung x^{18} der Sekundärspule hervorgerufen wird, eine entgegengesetzte Richtung (<—) gegenüber demjenigen der Abteilung x' der Sekundärspule. In der Zeichnung sind die durch Induktion erregten Abteilungen der Sekundärspule durch eine stärkere Linie angedeutet und ist ihre Verbindung mit dem betreffenden Bürstenpaar am Stromwender ersichtlich gemacht. Die Bürsten der beiden einander gegenüberliegenden Abteilungen stehen ungefähr in der Mitte der Länge einander benachbarter Stege und die positiven und negativen Bürsten beider Paare sind an die entsprechenden Teile der äufseren Leitung angeschlossen.

Dritte Stellung (Fig. 3 Tafel VII): Die Ankerbürsten verlassen nunmehr den Überbrückungspunkt und befinden sich nur noch mit denjenigen Stegen in Berührung, die den Abteilungen x und x^{12} entsprechen. Diese treten infolgedessen wieder in Thätigkeit, aber die Richtung, in welcher der Strom dieselben jetzt durchläuft, ist derjenigen entgegengesetzt, in welcher der Strom unmittelbar vor dem Eintritte der Bürsten in die Überbrückungsstellung sich bewegte, denn die Spulenabteilungen haben ihre Stellung insofern geändert, als sie inzwischen von dem einen Teile des Feldes in den anderen übergetreten sind. Der induktive Einfluſs der Abteilung x beim Übergange vom neutralen in den wirksamen Zustand äufsert sich dahin, daſs er die Neigung besitzt, einen sekundären Impuls von einer dem Flusse (<—) des primären entgegengesetzten Richtung (—>) hervorzurufen. Aber der sekundäre Impuls, der alsdann in der daneben liegenden Abteilung x' hervorgerufen wird, besitzt jetzt dieselbe Richtung (—>), wie sie der darin vor dem Ausschalten hervorgerufene Impuls besaſs. Die zur Zeit noch immer auf dem Stege der

Abteilung x befindliche Bürste der Sekundärspule führt diesen sekundären Stromstofs in die äufsere Leitung über. Der gleichzeitig an der (im Sinne des Kreisdurchmessers) entgegengesetzten Abteilung x^{18} hervorgerufene sekundäre Stromstofs von entgegengesetzter Richtung (<—) wird durch die dieser Abteilung entsprechende Stromwenderbürste nach derselben Seite der Leitung übergeführt, so dafs diese beiden Impulse zusammen in der Art eines gleichgerichteten Stromes austreten.

Vierte Stellung: Die Ankerbürsten bewegen sich in gleicher Richtung auf den Stromwenderstegen weiter, mit welchen sie bei der vorerwähnten dritten Stellung in Berührung waren. Infolgedessen tritt in den Ankerabteilungen eine Änderung des elektrischen Zustandes nicht ein und es werden sekundäre Ströme in der Sekundärspule nicht hervorgerufen. Die der letzteren entsprechenden Stromwenderbürsten befinden sich nunmehr am Überbrückungspunkt und würden, wenn jetzt Strom vorhanden wäre (was indessen nicht der Fall ist), einen schädlichen Kurzschlufs desselben bewirken. Ehe nun aber die Bürsten des Ankers den Überbrückungspunkt erreichen, wird dieser von den Bürsten der Sekundärspule bereits überschritten. Dies hat zur Folge, dafs, wenn nunmehr in den Abteilungen $x^8\,x^{15}$ beim Ausschalten der nächsten Abteilungen $x^9\,x^{14}$ die Induktionswirkung eintritt, die Bürsten der Sekundärspule in eine solche Stellung gelangt sind, dafs die sekundären Impulse, wie vorher, in den äufseren Stromkreis übergeführt werden.

Fünfte Stellung: Im ganzen sind 12 Spulenabteilungen und dementsprechend 12 Stromwenderstege mit 12 Isolierstreifen vorhanden, so dafs also im ganzen 24 einzelne Stellungen im Stromkreise vorkommen. Nach dem Durchlaufen von 12 von diesen Stellungen ändert sich bei jeder einzelnen Spulenabteilung der elektrische Zustand. Die aufeinander folgenden Abteilungen bewirken nacheinander diese Änderungen bei den verschiedenen Überbrückungsstellen.

Wie sich die Änderungen von (—> nach o) und (o nach <—) bei der Spulenabteilung x vollziehen und welche Induktionswirkungen dabei in die Erscheinung treten, ist bereits erläutert worden. Die gleichen Vorgänge wiederholen sich bei sämtlichen 12 Abteilungen, worauf die Abteilung x wieder eine Änderung von (<—) nach (—>) vollführt, um dann während der übrigen

12 Stellungen in dem zuletzt angenommenen Zustande zu verharren. Da die Anordnung und die Beziehung der einzelnen Teile zu einander durchweg symmetrisch ist, so kann wohl an dieser Stelle von einer weiteren eingehenden Erörterung der elektrischen Wirkungen und Rückwirkungen Abstand genommen werden. Wie aus dem bisher Gesagten erhellt, ist es möglich, den inneren Stromkreis mit seinen Polwechselungen in wirksamer Weise dadurch zur Erlangung eines zweiten elektrischen Stromes auszunutzen, dafs man diesem Stromkreise in zweckentsprechender Anordnung einen sekundären Leiter darbietet, der auf die Änderungen in der Polarität des in der Dynamoankerspule sich bewegenden primären Stromes anspricht. Wenn man die Maschine als Treibmaschine, statt als dynamoelektrischen Stromerzeuger verwendet, so wird trotzdem die mittlere Sekundärspule beibehalten und in gleicher Weise zur Ausnutzung der durch die Stromänderungen veranlafsten Induktionswirkungen verwendet, wie diese nacheinander in den einzelnen Abteilungen der Spulen auftreten, welche letzteren in diesem Falle die in Umdrehung befindlichen Treibmaschinenanker *D* vorstellen. Bei der einen wie der anderen Anwendungsweise der Maschine ist die induktive Thätigkeit vorhanden und nichts weiter nötig, als dafs die parallele Sekundärspule innerhalb des beeinflufsten magnetischen Feldes unter den entsprechenden Bedingungen dargeboten wird, um den dadurch hervorgerufenen zweiten Strom in den äufseren Stromkreis gelangen zu lassen. In diesem Sinne würde es auf dasselbe herauskommen, wenn man in den vorstehenden Erörterungen durchweg die Bezeichnung „Dynamo-Maschine“ durch die Bezeichnung „Treibmaschine“ ersetzen würde.

Man hatte bereits früher vorgeschlagen, eine elektrische Maschine zu bauen, bei welcher der Feldmagnet zwischen den Polen mit einem gewöhnlichen Anker oder Kern zur Vervollständigung des magnetischen Stromkreises ausgestattet ist. Um den Ankerkern herum wurde erstens die eigentliche Spule und zweitens eine Sekundärspule gewickelt, jede mit eigenem Stromwender und eigenen Bürsten. Beide Spulen waren gleichmäfsig den magnetischen Kraftlinien ausgesetzt. Bezweckt wurde mit dieser Anordnung die Erzielung eines besonderen Stromes in der Sekundärspule durch elektrische Induktion infolge Unterbrechens oder Ausschaltens des Hauptstromes in der primären Spule. Die

Beeinflussung des magnetischen Flusses wurde ausschliefslich der primären Spule zugeschrieben.

Nach dieser Konstruktion wird die zweite Spule dem magnetischen Kraftfelde vollständig entrückt und zu diesem Zwecke getrennt von der Primärspule oder dem Ankerkern angeordnet, während diese, wie gewöhnlich, dem magnetischen Felde vollständig ausgesetzt bleiben. Es wird hiermit bezweckt, den zweiten Strom in der Nebenspule durch reine elektrische Induktion infolge der Nähe und parallelen Anordnung der sekundären und primären Spulen von der letzteren zu erhalten. Soweit die sekundäre Spule gemeinsam mit der primären Spule dem magnetischen Einflusse unterworfen ist, ist dieser Einfluſs ein schädlicher. Aus diesem Grunde werden auch bei der getrennten Anordnung von Primär- und Sekundärspule, wie beschrieben, diejenigen Übelstände vermieden, welche die Vereinigung und die gemeinsame Anordnung dieser Teile auf einem einzigen Ankerkerne bisher zur Folge hatte.

Im Vorstehenden sollten nur die einfachen induktiven Wirkungen erläutert werden, welche in den aufeinander folgenden sekundären Spulenabteilungen beim Ein- und Ausschalten des Stromes in der daneben befindlichen Abteilung der Primärspule in die Erscheinung treten. Nun hat aber die Beobachtung gelehrt, daſs irgend eine bestimmte Abteilung der Ankerspule, nach dem Übergange von dem einen Felde in das andere am Überbrückungspunkte, während der Dauer ihres Durchganges durch das neu erreichte magnetische Feld bestimmte, gegeneinander abgestufte Änderungen in ihrem elektrischen Zustande erfährt. Wenn man beispielsweise von der negativen Bürste als Nullpunkt oder Minimalpunkt ausgeht, so zeigen die beiderseitigen symmetrischen Spulenabteilungen einen gleichen elektrischen Zustand bei nur entgegengesetzter Stromrichtung. Indessen zeigt dieser Zustand von der einen Abteilung zur nächsten Abweichungen und erreicht an der positiven Bürste das Maximum.

Diese Änderungen im elektrischen Zustande sind derartige, daſs sie in einem parallelen sekundären Drahte einen induktiven Impuls hervorrufen, und da sie stets gleichartig sind, d. h. vom Minimum zum Maximum übergehen, oder umgekehrt, so wird in der gegenüber befindlichen Spulenabteilung ein Strom von nur einer einzigen Richtung induziert, so lange die Abteilung der

primären Ankerspule und die Abteilung der Sekundärspule in demselben magnetischen Felde bleiben. In Wirklichkeit kann man daher die einander entsprechenden Bürsten des Ankers und der Sekundärspule (im radialen Sinne) im wesentlichen in dieselbe Linie fallen lassen. Das bedeutet, dafs man statt der beschriebenen paarweisen Bürstensätze für die Sekundärspule einfache Bürsten anwenden kann, die man einander gegenüber und, mit Bezug auf die ebenfalls einfachen Bürsten der primären Ankerspule, fast in gleicher Linie (im elektrischen Sinne) nach dem Durchmesser des Stromwenders anordnet. Bei dieser Anordnung befindet sich die eine Hälfte der Spulenabteilung, am Anker sowohl wie an der Sekundärspule, gleichzeitig im einen Felde, während sich die zweite entgegengesetzte Hälfte Spulenabteilungen in dem entgegengesetzten Felde befindet. Somit können die Abteilungen der Sekundärspule, die darin durch die fortschreitenden Änderungen im elektrischen Zustande der daneben befindlichen und im gleichen magnetischen Felde sich fortbewegenden Primärspulenabteilungen induzierten, gleich gerichteten Stromimpulse entwickeln und in die äufsere Leitung abgeben. Dieser Strom wird demjenigen hinzugefügt, der durch das Ein- und Ausschalten, wie bereits beschrieben, auf induktivem Wege entwickelt worden ist, wobei die erwähnte Änderung in der Bürstenanordnung eine Beteiligung der sämtlichen Spulenabteilungen an den Induktionswirkungen ermöglicht. Es erhellt, dafs bei Anwendung von Doppelbürsten, wie weiter oben beschrieben, mit Ausnahme der einen Spulenabteilung, welche jeweilig in den Stromkreis eingeschlossen ist, keine von den Abteilungen in vorteilhafter Weise der durch die sich steigernden Änderungen im elektrischen Zustande bedingten Induktionswirkung, wie oben beschrieben, ausgesetzt wird.

Die beiden Spulen, d. h. die primäre Ankerspule und die Sekundärspule, können als Stromwandler dienen, einerlei, ob der elektrische Zufluſs durch Induktion seitens des Feldmagneten hervorgerufen, oder ob er von irgend einer anderen Quelle aus in die primäre geleitet wird. Da die Spulen nach Art des Grammeschen Ringes eingerichtet und in der bereits beschriebenen Weise ihrer Lage nach angeordnet sind, so lassen sich die induktiven Einwirkungen der Primären auf die Sekundäre ausnutzen. Unter der Bezeichnung „Anker nach Grammescher Art“

ist hier ein solcher Anker zu verstehen, bei welchem eine ununterbrochene oder endlose Spule in mehrere Einzelabteilungen zerlegt ist, welche den Anker entweder im offenen oder im geschlossenen Stromkreise einschliefsen und dementsprechend mit den verschiedenen einzelnen Stromwenderstegen verbunden sind.

Es ist wohl klar, dafs es der Geschicklichkeit des Konstrukteurs überlassen bleiben mufs, die baulichen Einzelheiten mehr oder weniger zu ändern und dafs man auch verschiedenerlei Arten von Maschinen anwenden kann, ohne dadurch von dem vorstehend entwickelten Konstruktionsprinzip abzuweichen; denn dieses gründet sich im allgemeinen darauf, an der Maschine eine Neben- oder Sekundärspule unter solchen Bedingungen anzubringen, dafs dadurch die Induktionswirkungen ausgenutzt werden, welche dadurch hervorgerufen werden, dafs man den elektrischen Zustand der Ankerspule ändert.

Die Tafel VIII zeigt einige neuere Konstruktionen der Firma „Oerlikon". Die Fig. *1* dieser Tafel bietet ein Bild der Einphasen- und Mehrphasen-Wechselstrom-Maschine der genannten Fabrik. Bei dieser Konstruktion ruhen alle stromführenden Teile, ähnlich wie wir es auf Seite 178 beschrieben haben, und nur der in der Figur deutlich sichtbare, sternförmige Stahlgufskörper wird rotiert, um Änderungen des Magnetfeldes und dadurch Induktionswirkungen zu erzielen. Die sämtlichen Spulen, in welchen der Induktionsstrom erregt wird, sind mit Glimmer vortrefflich isoliert und in zwei Kränzen angeordnet. Letztere liegen in Vertiefungen der beiden laminierten ringförmigen Eisenkörper und sind diese in den äufseren zylindrischen Stahlmantel eingepasst. Die Vertiefungen (Nuten) sind nahezu geschlossen, so dafs der erwähnte Eisenkörper den Zacken des rotierenden Teiles eine nahezu kontinuierliche Oberfläche darbietet. Zwischen den beiden Kränzen, in welchen die obenerwähnten Induktionsspulen ruhen, liegt die kreisförmige Magneterregerspule, welche den beweglichen, sternförmigen Stahlgufskörper magnetisieren mufs und die ihren Strom (von ca. 50 Volt Spannung) von aufsenher erhält. Die Enden der Induktions- (also Hochspannungs-) -Wickelung sind an einer, Unbefugten unzugänglichen Stelle zu den Klemmen geführt. Der maximale Spannungsunterschied zwischen Leergang und Vollbelastung, gleiche Tourenzahl vorausgesetzt, beträgt bei Licht-

betrieb 5%, beim Motorenbetriebe 15%, kann aber durch Regulierung des 50 voltigen Erregerstromes ausgeglichen werden.

Diese Maschinen eignen sich auch als synchrone Motoren. Sie sind ohne Änderung oder Verschiebung irgend welcher Teile als Einphasen-Wechselstrom-Maschinen für Lichtbetrieb und auch als Drehstrom-Maschinen für Motorenbetrieb zu verwenden (siehe Seite 174 unten). Die Figuren *2* und *3* der Tafel VIII zeigen die Details jener Maschinen, die wir auf Seite 174 (Abs. 1, 2 u. 3) beschrieben haben; während Fig. *4* eine solche und zwar horizontal angeordnete Dynamo in direkter Verbindung mit der Welle einer Turbine dargestellt. Oerlikon versieht solche Anordnungen mit gut funktionierenden Entlastungsvorrichtungen. Wie aus der Fig. *3* ersichtlich ist, wurden hier an die Eisenkerne der Induktionsspulen verbreiternde Polschuhe angesetzt, um das Fluktuieren des magnetischen Feldes zu verringern, wodurch auch das Parallelschalten solcher Maschinen erleichtert und der Gang der Maschinen geräuschlos gestaltet wird.

Die Fig. *5* der Tafel VIII zeigt uns einen schaufelradförmigen Kern im Bilde, so wie wir denselben schon in Fig. 119 Seite 166 schematisch dargestellt haben. Auf die Polspitzen (s. Seite 175) und deren Befestigung wird ganz besonders aufmerksam gemacht, denn dieselben bilden ein wichtiges Konstruktionselement, das ganz aufserordentliche Sorgfalt erfordert. Bei Maschinen mit solchen Elektromagneten und dementsprechend zwei Kränzen von Induktionsspulen soll es sich empfehlen, die beiden Kränze um einen kleinen Winkel gegeneinander zu verschieben. Die Gröfse dieses Winkels ist experimentell leicht zu ermitteln.

IV. Abteilung.

Drehstrom-Motoren.

Einleitung. — Einfache Wechselstrom-Motoren und zwar: a) der synchrone, b) der asynchrone. — Schema einer zweiphasigen Drehstrom-Anlage. — Die Schlüpfung. — Der Motor „Schuckert-Bradley". — Der Tesla-Motor. — Der Motor der Stanley E. M. Comp. — Der Dreiphasen-Drehstrom-Motor der A. E.-G. — Der Anker von Lahmeyer-Frankfurt. — Der Drehstrom-Motor der Fabrik Oerlikon. — Der Motor von Siemens & Halske. — Verschiedene Konstruktionen: a) von M. M. Rotten, b) von Helios A.-G.

Anhang: Die Theorie der Drehstrom-Motoren.

Einleitung.

Die Wechselstrom-Motoren, welche direkt mit einphasigem Wechselstrome betrieben werden, bieten mehrere Übelstände und zwar gehen sie belastet nicht an, und dann bleiben sie auch bei der geringsten Überlastung stehen. Nach eingehenderer Betrachtung finden wir aber noch weitergehende Nachteile. Die mittlere Leistung eines solchen Motors

$$P = \frac{E_{max} J_{max}}{2} \cos \varphi,$$

während bei Gleichstrom-Motoren

$$P = EJ.$$

Bei gleicher Leistung und gleicher Spannung wird $J_{max} > J$ werden müssen, was dickere Drähte im Motor und den Zuleitungen erfordert.

Es ist ferner zu berücksichtigen, daſs solche Wechselstrom-Motoren den Gleichstrom-Motoren nur dann im Wirkungsgrade gleich sind, wenn sie synchron laufen. Wollte man bei syn-

chronen Motoren die zum Angehen erforderliche Zugkraft erreichen, so müfste man dieselben unverhältnismäfsig grofs bauen und bei mittlerer Belastung würde man Zugkraft vergeuden. Bei asynchronen, einphasigen Wechselstrom-Motoren wird ebenfalls eine bedeutende Menge von Energie nutzlos verbraucht, je mehr die wirkliche Umlaufsgeschwindigkeit von der synchronen abweicht.

Man war daher bestrebt, die Elektromotoren zu verbessern und ohne die Vorteile der Gleichstrom-Motoren aufzugeben, dabei doch die wesentlichen Vorzüge des Wechselstromes (billige Leitungen, Transformationsfähigkeit, einfachere Stromabnahme) auszunutzen. Man erreichte dies durch die Konstruktion der „Drehstrom-Motoren".

Auf welche Weise ein Drehfeld erzeugt wird, wurde schon auf Seite 82 eingehend erörtert. Mit Bezug auf die Erzeugungsweise unterscheiden wir bei den Motoren mit rotierendem Felde:

1. solche, bei welchen das Feld mit gewöhnlichen Wechselstrom-Maschinen mit einem einzigen Stromkreise erzeugt wird [1]),
2. solche, bei welchen mehrphasiger Wechselstrom zur Anwendung gelangt, mit der weiteren Unterscheidung:
   a) zweiphasiger Wechselstrom mit vier Leitungen,
   b) zweiphasiger Wechselstrom mit drei Leitungen und
   c) dreiphasiger Wechselstrom mit drei Leitungen.

Wenn zwei Wechselströme von derselben aber um eine Viertel-Periode gegeneinander verschobener Periode zwei rechtwinkelig angeordnete Stromkreise durchfliefsen, so ist die Resultante jedes der beiden magnetischen Felder (welches jeder Stromkreis erzeugen würde, wenn er allein vorhanden wäre), ein rotierendes magnetisches Feld von konstanter Intensität und gleichförmiger Drehungsgeschwindigkeit, welches während der Dauer einer Periode eine vollständige Umdrehung macht. Setzt man in dieses rotierende Feld einen in sich geschlossenen Stromkreis, so wird derselbe der Sitz induzierter Ströme und diese induzierten Ströme suchen den induzierten Stromkreis in dem Sinne der Rotation des Feldes zu

[1]) Bei den meisten solchen Motoren, die vom Jahre 1888 an konstruiert wurden, sind Hinweise auf Drehfeld-Motoren zu finden; eine strenge Gruppierung ist von da an kaum mehr durchführbar.

drehen. Abgesehen von der Art der Erzeugung des Drehfeldes ist die so erhaltene Rotation identisch mit derjenigen des klassischen unter dem Namen des Rotationsmagnetismus bekannten Versuches von Arago.

Man kann auch sagen, dafs der Motor mit rotierendem Felde infolge der Foucault-Ströme, deren Sitz er ist, funktioniert. Diese Foucault-Ströme würden Null sein, wenn der Stromkreis im Felde unbeweglich wäre, d. h. wenn derselbe sich mit derselben Geschwindigkeit drehte wie das Feld, und gerade, um dieser Bedingung der relativen Unbeweglichkeit zu genügen, dreht sich der Stromkreis in dem Felde und zwar in demselben Sinne wie dieses. Der Stromkreis folgt dem Felde.

Einfache Wechselstrom-Motoren.

Man kann auf verschiedenen Wegen mittels eines gewöhnlichen Wechselstromes zwei um eine Viertel-Periode in der Phase gegeneinander verschobene Wechselströme, die somit ein rotierendes Feld erzeugen können, erhalten. Ferraris hat vorgeschlagen, zwei Stromkreise anzuwenden, von denen der eine direkt von der Wechselstrom-Maschine, der andere von dem sekundären Stromkreise eines Transformators, dessen Primärkreis mit der Wechselstrom-Maschine parallel geschaltet ist, gespeist wird. Tesla hat zwei parallel geschaltete Stromkreise von sehr verschiedener Selbstinduktion vorgeschlagen und angewendet.

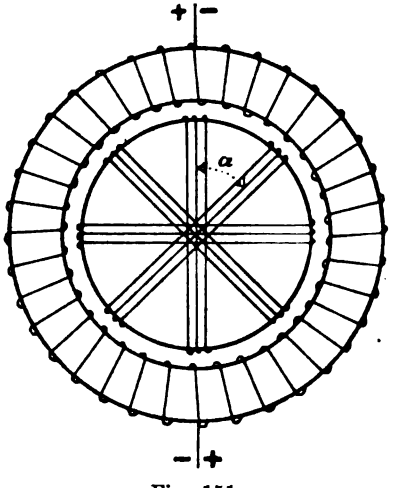


Fig. 151.

Die Fig. 151 zeigt das Schema eines einphasigen, asynchronen Wechselstrom-Motors. Ein feststehender Eisenring ist mit Draht umwickelt und hat diagonal angelegte Stromzuführungspunkte, in welche einphasiger Wechselstrom eingeführt wird und der sich daher bei den Eintrittsstellen in zwei Zweige teilt. Auf diese Weise erhält man ein zweipoliges Magnet-

feld. In letzterem rotiert ein Anker, der mit vier kurzgeschlossenen Spulen umwickelt ist.

Prof. Arnold weist folgendes nach: Bewegt sich der Anker synchron mit dem induzierenden Magnetfelde, so werden in den Ankerwindungen Ströme induziert, deren Periodenzahl gleich der doppelten Periodenzahl des Erregerstromes, deren maximale *EM*-Kräfte einander gleich, deren Phasen aber um den Winkel, den die betrachteten Windungen miteinander einschliefsen, gegeneinander verschoben sind.

Dafs bei synchroner Bewegung einer Windung in einem periodischen Magnetfelde ein Strom von doppelter Periodenzahl induziert wird, läfst sich graphisch darstellen. Durch die Induktion des periodischen Feldes wird vorerst eine *EMK* induziert, welche in Fig. 152 durch die Sinuslinie e_i dargestellt ist. Diese hat immer die gleiche Richtung, weil sich die Spule beim

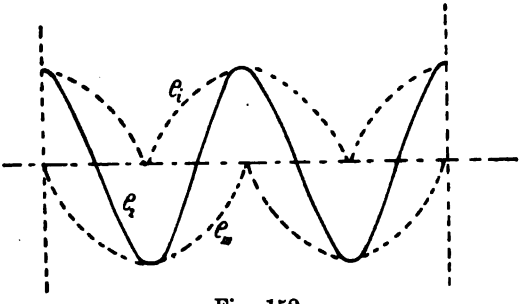


Fig. 152.

Richtungswechsel des Feldes um 180° gedreht hat und sie erscheint daher wie ein intermittierender Gleichstrom. Durch die Bewegung der Windung wird eine zweite *EMK* induziert, welche in der Fig. 152 durch die Linie e_m dargestellt ist. Auch diese Kurve verläfst ihren Quadranten nicht, d. h. die *EMK* bleibt gleichgerichtet, ist aber zu e_i entgegengesetzt gerichtet und zu dieser in der Phase um $\frac{\pi}{2}$ verschoben. Als Resultante erhalten wir offenbar e_2 von doppelter Periodenzahl, aber gleicher Amplitude.

Sind auf dem Anker aber mehrere kurzgeschlossene Spulen verschiedener Phase vorhanden, so werden die in den Windungen induzierten Ströme ein Drehfeld erzeugen. Der mit den Windungen

bewickelte Anker dreht sich nach der einen Richtung, das sekundäre Drehfeld nach der anderen Richtung.

Bewegt sich jedoch der Anker nicht synchron, so kann sowohl durch zwei untereinander schwingende, nach dem Sinusgesetze variierende Magnetfelder verschiedener Phase ein Drehfeld erzeugt werden, oder man erhält letzteres durch eine magnetisierende Spule, welche sich in demselben Sinne und mit derselben Winkelgeschwindigkeit wie das Drehfeld bewegt.

In weiterer und zwar mathematischer Ausführung kommt Prof. Arnold zur Darstellung des kreisförmigen, elliptischen und geradlinigen Drehfeldes und er zeigt, dafs man auf solchem Wege schliefslich zum einfach oder wohl auch zum kombiniert oscillierenden Felde gelangen mufs.

Es mangelt uns der Raum, die bezüglichen Erörterungen hier des weiteren auszuführen; wer sich dafür interessiert, dem

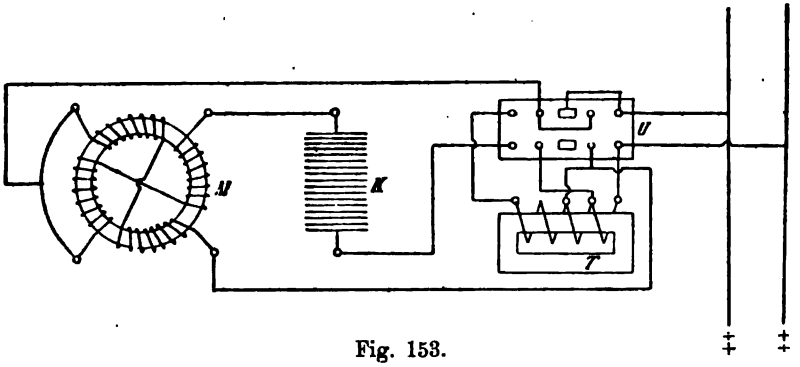


Fig. 153.

sei Prof. Arnolds Broschüre „Die Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrom-Motoren“ (Verlag A. Seidel, Berlin 1894) bestens empfohlen.

C. L. Brown hat einen asynchronen Drehfeld-Motor konstruiert, welcher mit einphasigem Wechselstrome betrieben werden kann und ist die bezügliche Anordnung aus Fig. 153 ersichtlich. In der Leitung zirkulieren einphasige Wechselströme. Eine Leitungschleife führt zuerst zum Umschalter U; hier teilt sich die Leitung einerseits zum Transformator T, welcher nur eine Windung hat und wird von dieser ein Teil abgezweigt. Der abgezweigte Leiter führt zu einer Flüssigkeitskapazität K, welcher die Phasenverschiebung (90°) veranlafst. Nun wird in der

weiteren Folge die Verbindung mit dem Motor *M* nach dem Schema hergestellt. Letzterer entspricht der Ferraris-Schaltung; es wird in ihm ein Drehfeld erregt und in der später zu besprechenden Weise ausgenützt. Die Erregerwickelung, welche nur von einem geringen Strome beansprucht wird, ist auch dünner gehalten. Während beim Angehen der Hebel des Umschalters nach links gelegt wird, wodurch der Transformator, Kapazität und Erregerwickelung in Thätigkeit treten, so werden diese Leitungsteile durch Umlegen des Hebels nach rechts ausgeschaltet, was geschehen kann, wenn der Motor seine normale Tourenzahl erreicht hat.

Shallenberger ordnet einen in sich geschlossenen und gegen den von der Wechselstrom-Maschine gespeisten primären Stromkreis schief gestellten induzierten Stromkreis an. Die Reaktionen zwischen dem Hauptstromkreise und dem induzierten Stromkreise erzeugen ein rotierendes Feld. In dem Motor Hutin & Leblanc wird das rotierende Feld durch zwei Reihen von parallel geschalteten Spulen hervorgebracht, wobei jedoch in den einen der beiden Stromkreise ein Kondensator eingeschaltet wird. Man erhält auf diese Weise sehr leicht eine Phasenverschiebung um eine Viertel-Periode, die für die Erzeugung des Drehfeldes erforderlich ist.

Das sind jedoch zumeist Kunstmittel (siehe auch Seite 110), die wohl ihren Zwecken entsprechen, immerhin aber durch die Anwendung direkt erzeugter, verschiedenphasiger Ströme weitaus übertroffen werden, und zwar nicht nur in der Einfachheit der Konstruktion und den äußeren Anordnungen, sondern auch in betreff sicherer Funktion und einfachen Betriebes. Wir wollen uns hier also auch zumeist mit den Motoren der Gruppe II beschäftigen. Obwohl Drehstrom-Motoren eine verhältnismäßig neuere Erfindung sind, so bietet uns ein Überblick über die vorhandenen Konstruktionen doch ein sehr mannigfaltiges Bild. Wir haben das Gebotene in zwei Gruppen zu unterteilen, weil zwei Punkte bei der Bestimmung der Type ausschlaggebend sind. Es kommt darauf an, wie das Drehfeld erzeugt wird, und dann, was für Stromerzeuger zur Erregung des Drehfeldes verwendet werden.

Tesla (zweiphasige) Drehstrom-Motoren.

Betrachten wir noch einmal, und zwar (nach einer von O. v. Miller angegebenen Form) an den Fig. 154 bis 161 die Art und Weise, wie ein Drehfeld erzeugt und zur Erzielung einer Rotationsbewegung ausgenutzt wird. Im unteren Theil der Figuren ist ein halbkreisförmig gebogener Elektromagnet angedeutet, zwischen dessen Polen ein Trommelanker mit zwei Windungen, welche senkrecht zu einander stehen, rotiert werden kann. Eine einfache Überlegung zeigt, dafs wir bei der Rotation in beiden Wickelungen, also auch in den beiden angedeuteten Stromkreisen, besondere Wechselströme erhalten, welche mit Bezug auf die Zeit ihres Auftretens, ihrer Maxima etc. um 90° verschoben sind. Diese Anordnung repräsentiert also eine zweifache Wechselstrom-Maschine.

Wenn man nun einen Eisenring mit Multiplikationsspulen umwickelt, wie es der obere Teil der Figuren andeutet, und die Enden der Spulen nach dem Schema verbindet, dann wird beim Zirkulieren der beiden Ströme im Eisenring eine Rotation der Pole eintreten. Man mufs beim Verfolgen der Stromläufe berücksichtigen, dafs die Stromstärke in einem der Kreise dann sein Maximum erreicht, wenn im anderen Stromkreise die Stromstärke gleich Null ist, was in den Fig. 154, 156, 158 und 160 (Seite 218) zutrifft.

Ferner ist aus dem Diagramm Fig. 51 Seite 87 ersichtlich, dafs in gegebenen Zeitmomenten die Ströme zwar entgegengesetzt gerichtet, aber gleich stark sind, was bezüglich der Stromrichtung in den Fig. 155, 157, 159 und 161 (Seite 219) durch die Pfeile in den Leitungslinien ersichtlich gemacht worden ist.

Berücksichtigt man nun die Wirkung der Wechselströme auf den Eisenring, so ist klar, dafs die diametral stehenden Pole rotieren müssen, dafs sich eine freischwebende Magnetnadel mit den Polen drehen wird, und schon Ferraris hat nachgewiesen, dafs auch ein Kupferzylinder, passend und freibeweglich in dem vom Eisenring umgebenden Raum — dem Drehfeld — untergebracht, infolge der Foucault-Ströme mit dem Felde rotieren mufs.

Der Kupferzylinder des Ferraris wurde von späteren Konstrukteuren durch einen Eisenzylinder ersetzt; doch beginnt hier das Gebiet der Praxis, und was auf diesem geleistet wurde, das soll in Nachstehendem unter Berücksichtigung der Angaben der

Konstrukteure ausreichend dergestellt werden, um dann die Versuche, eine Theorie der Drehstrom-Motoren aufzustellen, an-

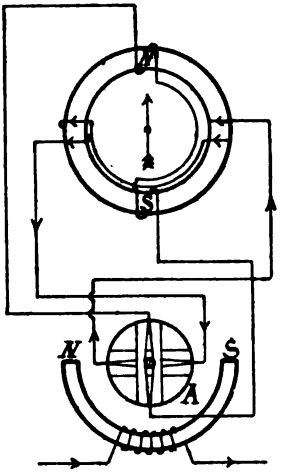


Fig. 154.

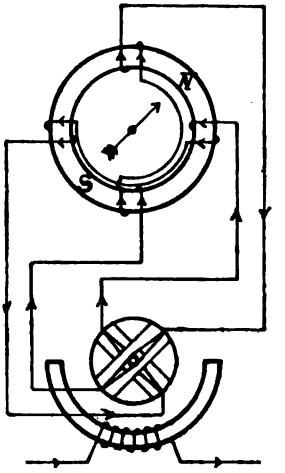


Fig. 155.

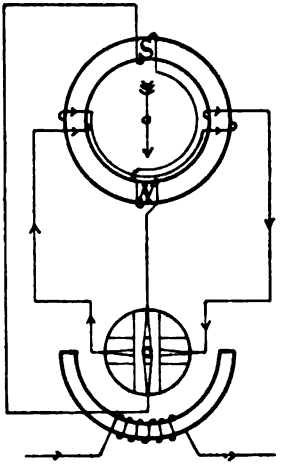


Fig. 158.

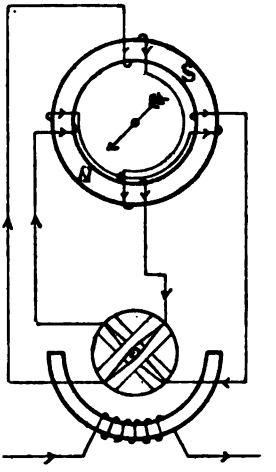


Fig. 159.

schliefsen zu können. Schon aus dem Vorgesagten erhellt, dafs jeder Drehstrom-Motor aus zwei Hauptteilen besteht:

1. aus dem Eisenkörper, in welchem der wandernde Pol als Bewegungsursache infolge der von aufsen zugeleiteten

elektrischen Energie erregt wird. Dieser Teil wird zumeist und kurzweg „das Feld“ genannt.

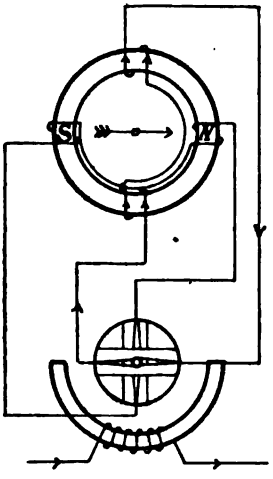


Fig. 156.

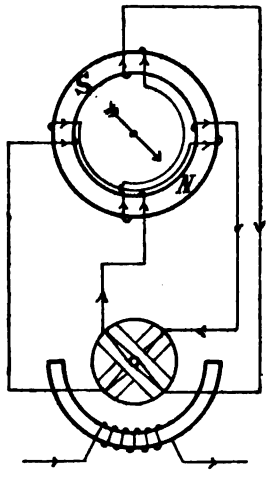


Fig. 157.

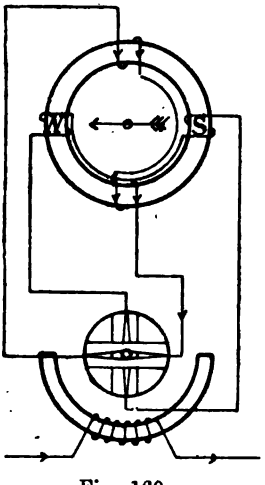


Fig. 160.

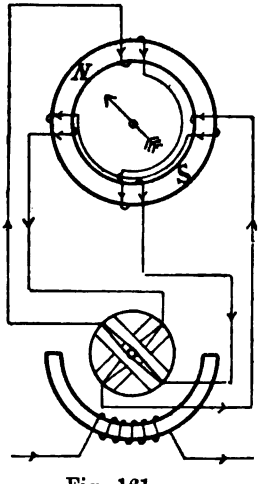


Fig. 161.

2. aus dem „Anker“, welcher entweder aus Kupfer oder in der Praxis aus unterteiltem oder (seltener) aus massivem Eisen besteht und mit Leitungen umwickelt ist, die entweder kurz geschlossen, oder derart gewickelt und mit

elektrischem Strom gespeist sind, dafs ihre elektromagnetische Wirkung die Rotation des Ankers unterstützt.

Es ist nun dem Wesen nach gleichgiltig und nur für den Konstrukteur interessant, ob das Feld den Anker einschliefst und dieser im geschlossenen Drehfelde rotieren mufs, oder ob der Anker das Feld umschliefst und ersterer daher die rotierende Peripherie bildet.

Bei den Drehstrom-Dynamos ergiebt sich — wie wir schon gesehen haben — die Wechselzahl aus der Polzahl und Umdrehungszahl; bei den Motoren folgt die Umdrehungszahl aus der gegebenen Wechselzahl und der Polzahl des Motors.

Motoren haben nun je nachdem zwei, vier, sechs, acht u. s. w. Pole, und man erhält daher bei gegebener Wechselzahl nur ganz bestimmte Umdrehungszahlen, z. B. bei 100 Wechsel in der Sekunde 3000, 1500, 1000, 750 Umdrehungen in der Minute. Bei Vollbelastung bleiben die Drehstrom-Motoren etwas zurück. (Dreiphasige bis ca. 5 %.)

Bei den modernen Drehstrom-Motoren ist aus der äufseren Form die Zahl der Pole nicht ohne Weiteres zu erkennen. Die Fig. 162 zeigt das Schema eines Motors, bei welchem sowohl im Felde, als auch korrespondierend im Anker die Pole besonders markiert sind. Die Funktion entspricht jener, die wir in den Fig. 88 bis 90 (Seite 128) veranschaulicht haben. Die Erfahrungen der Praxis haben bald ergeben, dafs man ohne dieses Hervorheben der Pole arbeiten kann und dafs man sogar bessere Wirkungen erzielt, wenn man in innere Feldfläche und die äufsere Ankerfläche in der ganzen Länge ununterbrochen parallel und mit dem Eisen möglichst nahe aneinander stellt, so wie dies in Fig. 163 dargestellt worden ist. In letzterer ist auch der Verlauf der Kraftlinien angedeutet. Es ist wichtig, dafs man sich davon das richtige Bild geschaffen hat; denn nur so wird die Erkenntnis der Wirkungsweise solcher Motoren wesentlich gefördert und erreicht. Bei der Funktion der Drehstrom-Motoren ergeben sich Differenzen der Winkelgeschwindigkeiten des Feldes und des

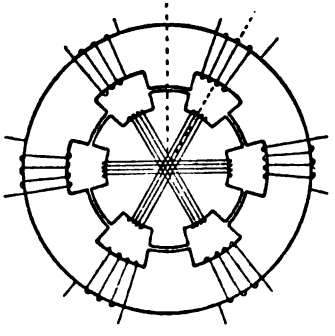


Fig. 162.

Ankers; man nennt diese Differenz: „die Schlüpfung“; dieselbe ist gleich

$$p_1 - p_2 = 2\pi n_1 - \frac{\pi n_2}{30},$$

wobei n_1 die Periodenzahl des Primärstromes pro Sekunde, n_2 die Tourenzahl des Ankers pro Minute bedeutet.

Um sich die Wirkungsweise eine Drehstrom-Motors einfach erklären zu können, denke man sich eine Gleichstrom-Maschine mit permanenten oder separat erregten Elektromagneten. In einer

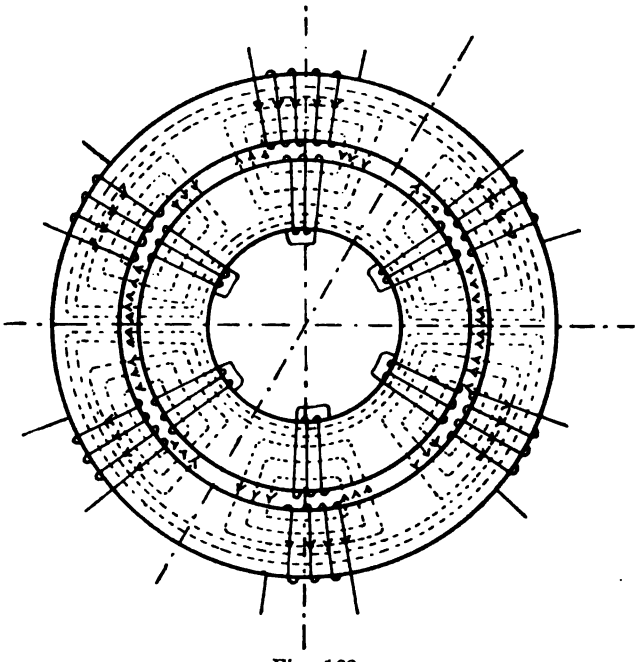


Fig. 163.

solchen kann man den Anker nicht ohne Kraftanstrengung in Rotation versetzen, weil die Armatur hier ein permanenter Anker der Magnete ist und von letzteren in einer bestimmten Lage (d. i. in der Verbindungslinie der beiden permanenten Pole) festgehalten wird. Würde man die Verbindungslinie im Winkel verschieben können, so ist klar, dafs der Anker dieser Bewegung folgen würde, und wenn man jene Linie um 360° dreht, wird auch der Anker eine vollständige Rotation ausführen. Im Dreh-

strom-Motor wird nun thatsächlich die magnetische Achse im Felde rotiert und so die Drehung des Ankers bewirkt.

Es werden durch die in der Phase verschobenen Ströme in Drehstrom-Motoren zwei magnetische Achsen erzeugt: eine im Felde, die andere im Ringe. In dem Diagramme Fig. 164 bedeutet I die kreisende Feldachse, II die im Anker entstehende, magnetische Achse. Fallen beide der Richtung nach zusammen, kann kein Drehmoment unerwartet werden. Bilden sie aber einen Winkel, dann haben sie das Bestreben, die gleiche Lage anzunehmen, und der Körper, welcher die eine Achse in sich trägt und beweglich ist, wird in Drehung versetzt. Die in der Figur tangential angebrachten Pfeile bezeichnen die Drehungsrichtung, welche von den Anschlufspunkten der Aufsenleitung in die Multiplikationsenden abhängt.

Die Drehungsrichtung beider magnetischer Achsen ist unter allen Umständen dieselbe und unabhängig von der mechanischen Drehung des beweglichen Motorteiles, welche in der Fig. 164 und 165 durch den gröfseren Pfeil angedeutet ist. Eilt I, in bestimmter

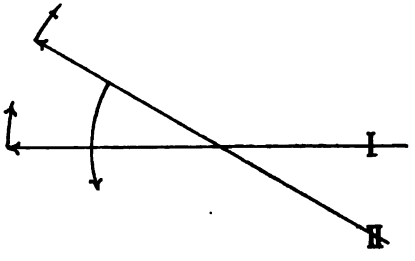


Fig. 164.

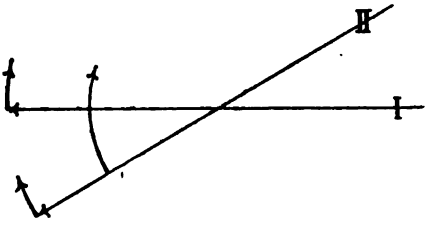


Fig. 165.

Richtung gesehen, vor, so ist die mechanische Drehung gleich der Drehungsrichtung der magnetischen Achsen. Eilt aber II, in derselben Richtung betrachtet, voraus, dann ist die mechanische Drehung des beweglichen Körpers der Drehungsrichtung der magnetischen Achsen entgegengesetzt. Die gewünschte Voreilung der einen oder anderen Achse erzielt man durch Umschaltung an der Klemme des Motors.

Drehstrom-Motoren ändern ihre Tourenzahl bei Vollbelastung um ca. 5 %, d. h. ihre Schlüpfung ist gleich 5 %. Diesen 5 % entspricht auch der prozentuale Wattverlust in den kurzgeschlossenen Ankerwindungen. Da sich diese als Verlust be-

zeichnete Energie in Wärme umsetzt, ist es sehr zu empfehlen, die Schlüpfung und insbesondere auch wiederholte Veränderungen in der Schlüpfung nach Möglichkeit zu vermeiden. Deswegen geht es auch nicht an, die Tourenzahl der Motoren durch Herabsetzung der Klemmenspannung (Einschalten von Widerständen) des Feldstromes (primären Stromes) vermindern zu wollen; die Schlüpfung würde zwar dadurch vergröfsert, das würde aber zu einer weitergehenden Erwärmung des Ankers führen, die eventuell schädlich werden könnte. Führt man, wie bei den Motoren der Firma Siemens & Halske, die Leitung des Motorankers mittels Schleiffedern nach aufserhalb der Maschine, dann kann man in diese Ankerleitung (sekundäre Leitung) Widerstände

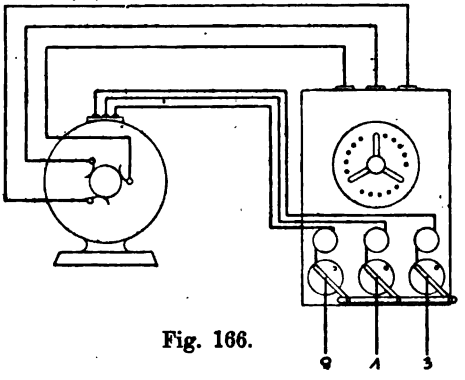


Fig. 166.

einschalten (Fig. 166), um die bei vermehrter Schlüpfung entstehende Wärme wenigstens nicht im Anker auftreten zu lassen.

Die Schlüpfung bereitet daher beim Anlaufen solcher Motoren einige Schwierigkeiten. Es ist selbstverständlich, dafs beim Anlauf des Motors nicht gleich normale Verhältnisse zwischen Feld- und Ankerrotation herrschen können. Je länger es dauert, bis diese Verhältnisse hergestellt, desto länger herrscht abnormale Schlüpfung, daher auch abnormale Wärmeentwickelung, und deswegen ist es das Bestreben aller Konstrukteure, die Anlaufszeit, d. i. die Zeit, bis zu welcher Feld und Anker normal laufen, auf das geringste Maafs zu beschränken.

Wenn aber bei der Funktion solcher Motoren Feld und Anker die gleichen Winkelgeschwindigkeiten hätten, so wären, wie schon erwähnt, das magnetische Bild ein konstantes und das Entstehen eines Drehmomentes zur Arbeitsleistung unmöglich. Nun kann

aber selbst beim Leerlauf kein idealer Synchronismus eintreten; denn der Widerstand in den Lagern, der Luftwiderstand etc. sind die ersten Veranlassungen zur Differenz in den Winkelgeschwindigkeiten; diese Differenz erhöht sich bei erfolgter Belastung und wird gröfser, je mehr man äufsere Arbeit beansprucht. Man hat allerdings auch synchrone Zweiphasen-Motoren gebaut, doch haben dieselben bezüglich der gebotenen Vorteile die einphasigen Wechselstrom-Motoren nur um weniges überholt.

Als Type für zweiphasige Drehstrom-Motoren ist in Europa nur eine Konstruktion der Firma „Schuckert" bekannt geworden.

Dieselbe liefs 1891 in Frankfurt a. M. eine Maschine ihrer Flachringtype als Motor laufen. Dieselbe war dadurch auffallend, dafs auf der Ankerachse ein vierteiliger Stromabnehmer (Fig. 111 Seite 157) aufgesetzt war. Die ganze Anordnung ist jener gleich, welche wir schon bei der Besprechung der Drehstrom-Dynamos dieser Firma kennen gelernt haben. Soll ein solcher Motor in Bewegung gesetzt werden, so nimmt der Ring zunächst durch die Schleifringe Wechselströme auf, die in ihrer Phase um 90° verschoben sind.

Die Kupferwickelung auf den Magnetschenkeln bleibt zunächst aufser Wirkung, da zum Anlaufen durch dieselben kein Strom geschickt wird, es wirkt nur die Eisenmasse der Magnetschenkel. Veranlafst durch die in ihrer Phase verschobenen Wechselströme entsteht im Ringe ein kontinuierliches Rotieren eines Magnetpoles. Würde der Ring feststehen und ihm ein Eisenanker drehbar gegenübergestellt, so würde dieser Anker sich im gleichen Sinne und mit der gleichen Geschwindigkeit um den Ring drehen, wie der Magnetpol im Ringe rotiert.

Bei der von Schuckert gewählten Anordnung werden also im Ringe rotierende Magnetpole erregt, und infolgedessen hat derselbe das Bestreben, sich so zu stellen, dafs diese Pole den Eisenkernen der Erregermagnete gegenüberstehen, weil dann die Kraftlinien durch diese Eisenmassen den besten Schliefsungskreis finden. Da der Magnetpol im Ring rotiert, so wird sich der Ring selbst im entgegengesetzten Sinne drehen. Solche Motoren laufen belastet an, es ist nicht erforderlich, dafs sie synchron laufen, sie werden aber immer Synchronismus anstreben.

Die Fig. 167 zeigt die bezügliche Schaltung, welche nach Teslas Konstruktion als die erste Ausführung der Ferrarischen Prinzipien (Fig. 168) bezeichnet werden kann. Betrachten wir einen dieser Stromkreise aufgerollt, so erhalten wir das Diagramm Fig. 169 (Seite 226), in welchem die strichpunktierte Linie anzeigt, wie das absolute Potential verläuft.

Dasselbe steigt in den beiden Spulen des Stromerregers steil an; in der Hinleitung fällt dasselbe nach dem bekannten Satze: Spannungsverlust = Stromstärke mal Widerstand ab; fällt dann rapid in den Spulen des Motors und steigt in der Rückleitung wieder bis zu seinem ursprünglichen Werte.

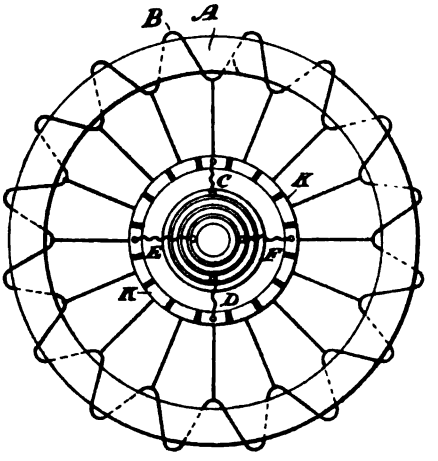


Fig. 167.

Herr A. du Bois-Reymond, der dieses Diagramm aufgestellt hat, bemerkt weiter zu demselben, dafs das Potential zwischen V_1 und V_2 stets gleich ist und auch gleich dem der Erde, wenn das ganze System von dieser wohl isoliert ist. Das

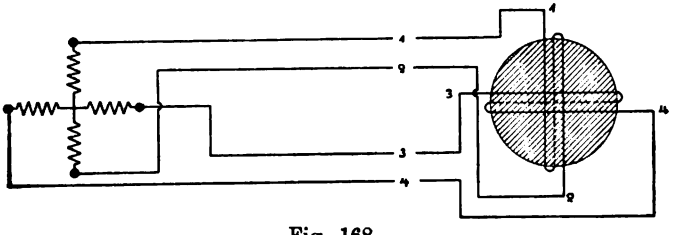


Fig. 168.

ist sehr wichtig. Man kann demnach diese beiden Punkte leitend verbinden, ohne dafs in dieser Leitung ein Strom zirkuliert, noch sonst eine Änderung des elektrischen Zustandes veranlafst wird. Man kann aber auch weiter die beiden Punkte V_1 der beiden im Stromerzeuger vorhandenen Systeme und die beiden Punkte V_2 der im Motor vorhandenen beiden Systeme untereinander

kurz verbinden, ohne dafs am Ganzen elektrisch irgend etwas geändert wird.

Es ist leicht ersichtlich, dafs die Leistung des Motors bei gleichbleibender Gröfse sehr wesentlich gesteigert werden kann, wenn man die Magnetschenkel gleichfalls magnetisiert, weil dann Zugkraft zwischen Magnetpol im Ringe und zwischen Magnetpol des Schenkels auftritt. Würde aber der Magnetismus der Magnetschenkel auch mittels Wechselstrom erzeugt, so müfsten die Magnetschenkel aus geteiltem Eisen hergestellt werden, und durch das beständige Ummagnetisieren derselben würde ein nicht unwesentlicher Verlust durch Magnetisierungsarbeit bedingt sein. Daher wird der Motor billiger und besser, wenn die Magnetschenkel mit konstantem Strom erregt werden, denn dann können

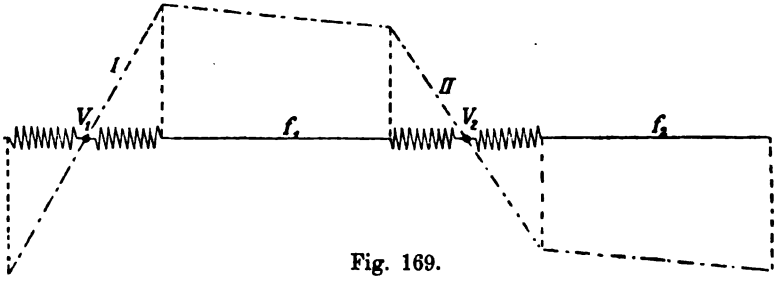


Fig. 169.

dieselben aus Gufseisen hergestellt werden und ist für ihre Erregung verhältnismäfsig nur wenig Kraft erforderlich, da der Magnetismus nur konstant gehalten zu werden braucht.

Die Magnete dürfen jedoch erst dann erregt werden, wenn der Motor den synchronen Gang schon erreicht hat. Würden sie früher erregt, so würde der Motor stehen bleiben, indem der Antrieb, den er durch die Zugkraft der Magnete erhält, nicht immer in gleichem Sinne wirken würde. Durch Ausschalten der Magneterregung würde der Motor jedoch sofort wieder angehen. Wenn auch nicht notwendig, so ist es doch empfehlenswerth, für den Maschinenwärter ein Erkennungszeichen anzubringen, woraus er direkt ersehen kann, wann der Motor synchron zur Primärmaschine läuft. Dazu dient ein gewöhnliches Voltmeter, welches an die Kupferwickelung der Magnete angelegt wird. Solange der Motor nicht synchron läuft, wird der Magnetpol im Ringe seinen magnetischen Schlufs bald durch die Luft, bald durch das Magnet-

eisen der Schenkel finden. Dies bedingt eine Veränderung der Zahl der magnetischen Kraftlinien, welche durch die Magnetschenkel hindurchgehen, und diese Veränderung erzeugt in der Wickelung der Schenkel eine elektromotorische Kraft. Erst wenn der Motor synchron läuft, stehen die Pole im Ringe ständig dem Magneteisen gegenüber, im letzteren ändert sich die Zahl der hindurchgehenden Kraftlinien nicht mehr wesentlich, in der Magnetwickelung wird keine elektromotorische Kraft mehr erzeugt. Das Voltmeter, das mit der Magnetwickelung verbunden ist, wird also beim Angehen erst sehr bedeutenden Ausschlag geben, allmählich zurückgehen und, wenn Synchronismus eingetreten ist, auf Null zeigen. Werden dann die Magnete mit Gleichstrom erregt, so zeigt das Voltmeter, das erst zur Erkennung des Synchronismus diente, die Gleichstromspannung an, mittels welcher die Magnete erregt werden.

Wenn der Motor mit konstant erregten Magneten arbeitet, so leistet er nach den Angaben der Firma das Vier- bis Fünffache von dem, was er ohne Magneterregung übernehmen kann. Den zur Speisung der Magnetschenkel erforderlichen Gleichstrom liefert bei den kleinen Maschinen der Wechselstrom-Motor selbst, indem an ihm neben den vier Schleifringen noch der Stromabgeber der gewöhnlichen Gleichstrom-Maschine angebracht ist. Für gröfsere Maschinen ist es wesentlich billiger, wenn an Stelle des Stromabgebers eine eigene kleine Erreger-Maschine in Anwendung gebracht wird, welche auf der sekundären Station direkt mit der Sekundär-Maschine gekuppelt werden kann. Schuckert hat in seinen neueren Konstruktionen wesentliche Anderungen eingeführt. (Fig. 132 Seite 181.)

Über die Durchführung des Prinzips der Teslaschen Erfindungen wurde schon im Kapitel über das Drehfeld eingehend und ausführlich gesprochen.

Die Fig. 170 (Seite 228) zeigt uns einen zweiphasigen Drehstrom-Motor nach der Type Teslas, wie derselbe 1893 von der Firma Westinghouse in Pittsburg gebaut, in Chicago ausgestellt wurde. Bei dieser Maschine werden die Ströme dem rotierenden Bestandteil (d. i. hier „die Armatur") durch den Vierring-Kollektor zugeführt, während die Spulen des stationären Bestandteiles (Tesla nennt diesen Teil: „das Feld") kurz geschlossen

sind. Zur besseren Veranschaulichung des Eisengerüstes ist die Abbildung derart ausgeführt, dafs die Maschine in einem Stadium vor der Bewickelung photographiert worden ist.

Wir sehen vor Allem rechts ein gufseisernes Gehäuse, welches einen Ring einschliefst, der aus Blechscheiben, ähnlich wie ein Grammescher Ring, aufgebaut ist. An der Innenseite dieses Ringes sind Kerbe zur Aufnahme von dicken Kupferdrähten vorgesehen. Diese Drähte stehen mit der äufseren Leitung gar nicht in Verbindung; sie sind parallel und kurz geschlossen, so dafs die bei der Feldrotation entstehenden Induktionsströme nur in

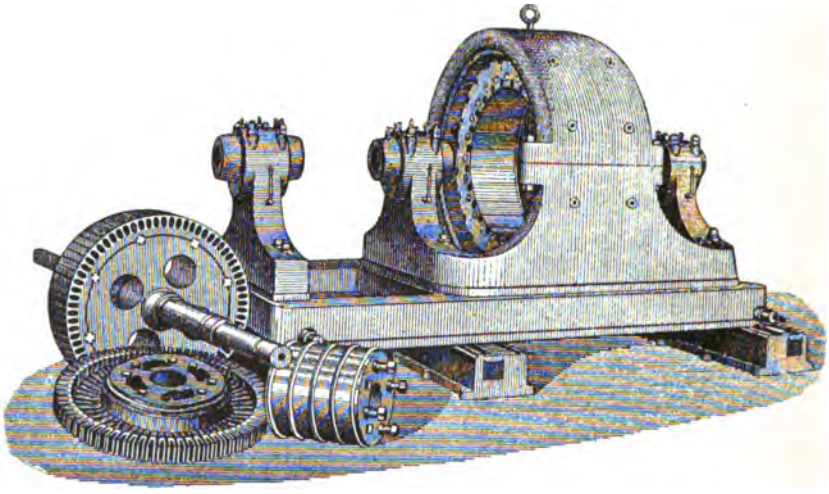


Fig. 170.

den kurz geschlossenen Leitern verlaufen. Wir werden bei einer anderen Gelegenheit den daraus entspringenden Nutzen ersehen. Links in der Figur sehen wir den Armaturkern; derselbe ist ebenfalls aus Eisen- und Papierscheiben aufgebaut und trägt an der Peripherie Nuten zur Aufnahme der Leitungsdrähte, welche durch den Vierring-Kollektor den zweiphasigen Strom nach dem Schema 168 und dem Diagramm 51 Seite 87 erhalten.

Vor der Armatur liegt eine Scheibe, welche einem schmalen Kommutator gleicht; sie wird parallel zur Armatur auf die Welle gesetzt und dient zur leichteren Herstellung der Drahtanschlüsse und Drahtverbindungen, welche nach dem System der Trommel ausgeführt werden. Diese Motoren haben also keine Kommutatoren,

keine mit Unterbrehung arbeitenden Kollektoren, sie sind, wie die Abbildung zeigt, gegen mechanische Angriffe gut geschützt; sie gehen belastet an und regulieren selbstthätig bei jeder Veränderung in der Belastung. Bei den grofsen Kraftanlagen an den Niagarafällen kommen solche Motoren zur Verwendung.

Ein in Chicago ausgestelltes Exemplar eines solchen Motors war zu einer Leistung von 500 PS bestimmt. Die Firma gab hierüber folgende Daten: Periodenzahl: 60 pro Sekunde; die Wickelung: zwölfpolig; Betriebsspannung: 200 Volt bei 600 Touren in der Minute; Stromstärke in jedem Zweig: 1000 Ampère. Der Feldmagnet hat 72 Nuten, und in jeder derselben liegen zwei dicke, isolierte Kupferdrähte, welche derart verbunden sind, dafs für jeden Kreis 72 Drähte in Trommelwickelung vorhanden sind. Teilen wir einen solchen Leiterkranz durch (2×12), so fliefst ein Wechselstrom durch die sechs ersten Kupferleiter in gleicher Richtung, sodann durch sechs Leiter der dritten Abteilung in entgegengesetzter Richtung etc. in Hauptstromschaltung, wodurch dann die erwähnten 12 Pole des Drehfeldes entstehen. Natürlich fliefst der zweite Strom durch die je sechs Leiter der Gruppen mit geraden Nummern.

Die Armatur hatte 24 Nuten und war bezüglich des Eisenaufbaues, gerade so wie das Feld, aus unterteiltem Eisen angefertigt. In jeder Nute ist, fast ganz von Eisen umschlossen, eine direkte Kupferspange eingebettet; dieselben sind in zwei Gruppen (ungerade und gerade Nummern) geteilt und jede Gruppe zu einer zwölfpoligen Trommelwickelung vereinigt. Der Durchmesser des Armaturkranzes hatte 1,7 m und eine Breite von 0,8 m.

Zum Anlassen dieses Motors dienten Kohlenwiderstände.

In Chicago hatte 1893 die Stanley Electric Mfg. Co. in Pittsfield (Mass.) einen Zweiphasen-Motor aufgestellt, welcher zwei getrennte Feldmagnete (Fig. 171 und 172, Seite 230) hatte, von denen jeder nur von einem der beiden in der Phase um 90° verschiedenen Wechselströme erregt wird. Die Magnete stehen fest und bilden den Aufsenring, die radialen Pole der beiden Teile sind um die halbe Poldistanz gegeneinander versetzt. Die Armatur besteht, dem Felde entsprechend, ebenfalls aus zwei getrennten Theilen. Dieselben werden aus weichen Eisenblechen aufgebaut, haben die gleiche Breite wie die korrespondierenden

Elektromagnete und sind mit geschlossenen Spulen gemeinschaftlich umwickelt. Die Figuren zeigen einen Motor mit acht Polen des Feldes. Die Armatur wird durch zwei Nutenanker gebildet,

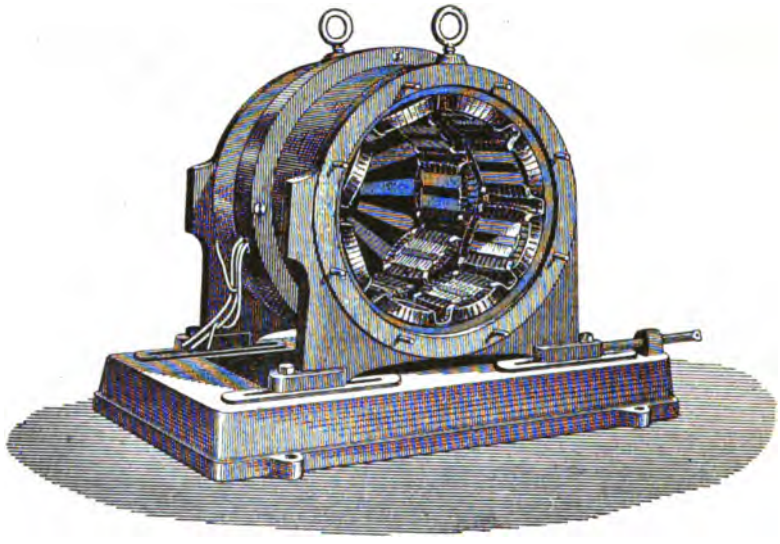


Fig. 171.

welche mit acht in sich geschlossenen Spulen umwickelt sind. Jede Spule umspannt einen Quadranten. Zwischen je zwei benachbarten Feldpolen sind drei in sich geschlossene Kupferleiter angebracht, um die Selbstinduktion in der Armatur zu verringern, infolgedessen stand auch die Windungsebene jener Kupferleiter parallel zur Ankeroberfläche.

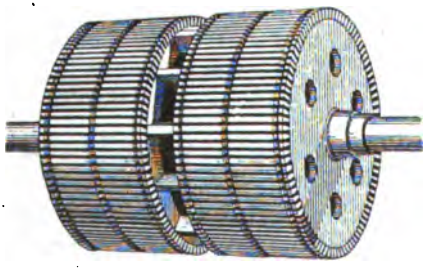


Fig. 172.

Diese Anordnung stammt von Dr. Johann Sahulka, welcher die gleiche Konstruktion schon im Heft 10 vom Jahre 1892 der Berliner elektrotechnischen Zeitschrift veröffentlicht hat. Wieso die oben erwähnte Gesellschaft im Juli und Oktober 1892 auf die gleiche Konstruktion ein Amerikanisches Patent erhalten konnte, ist bis jetzt noch nicht aufgeklärt worden.

Man hat sich in der Praxis mit Zweiphasen-Motoren viel Mühe gegeben und dieselben gegenüber den ersten Versuchen ganz wesentlich verbessert, dabei auch die Bedingungen für richtige Konstruktionen präzisiert; man hat ferner versucht, die Theorie solcher Motoren mathematisch auszuarbeiten; leider sind die so gefundenen Resultate durch die Experimente nicht bestätigt worden. Die mathematische Behandlung solcher Probleme ist eben schwierig; man wäre aber wahrscheinlich auch in diesem Falle zu guten Resultaten gekommen, wenn diese Motoren nicht dadurch geringwertiger geworden wären, dafs infolge der Einführung des Dreiphasenstrom-Systems die ärgsten Mängel ein- und zweiphasiger Motoren sofort und entschieden behoben worden wären. Es würde aber unrecht sein, zu glauben, dafs jene experimentellen Arbeiten nur mehr ein historisches Interesse haben, im Gegentheile: Gerade die Resultate jener Experimente haben wesentlich dazu beigetragen, über den dreiphasigen Drehstrom und dessen Bedürfnisse klare Anschauungen zu schaffen und dessen Verwendbarkeit zu fördern.

Dobrowolskys (dreiphasige) Drehstrom-Motoren.

Auch die dreiphasigen Drehstrom-Motoren bestehen aus zwei Hauptteilen: 1. das Feld, 2. der Anker.

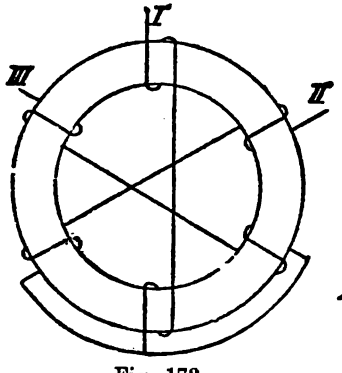


Fig. 173.

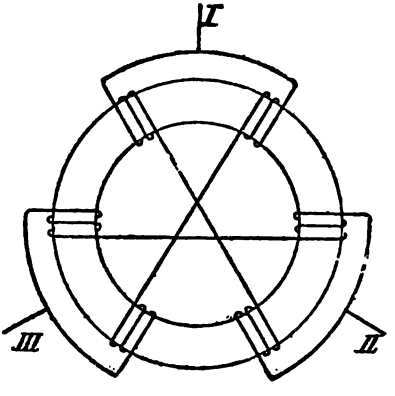


Fig. 174.

Das Feld wird geschaffen durch einen kreisrund gebogenen Elektromagneten, welcher ähnlich wie ein Grammescher Ring aufgebaut und auch in ähnlicher Weise bewickelt wird. Dieser

Teil des Motors besteht also aus Eisenblechringen (zumeist 0,8 bis 1,0 mm dick) und werden dieselben mittelst Papierscheiben (0,05 mm) von einander isoliert.

Der so gebildete Ring wird nach den Grundschemas Fig. 173 und 174 (Seite 231) bewickelt. Das Schema Fig. 175 zeigt uns eine detailiertere Drahtverbindung für einen bestimmten Fall und

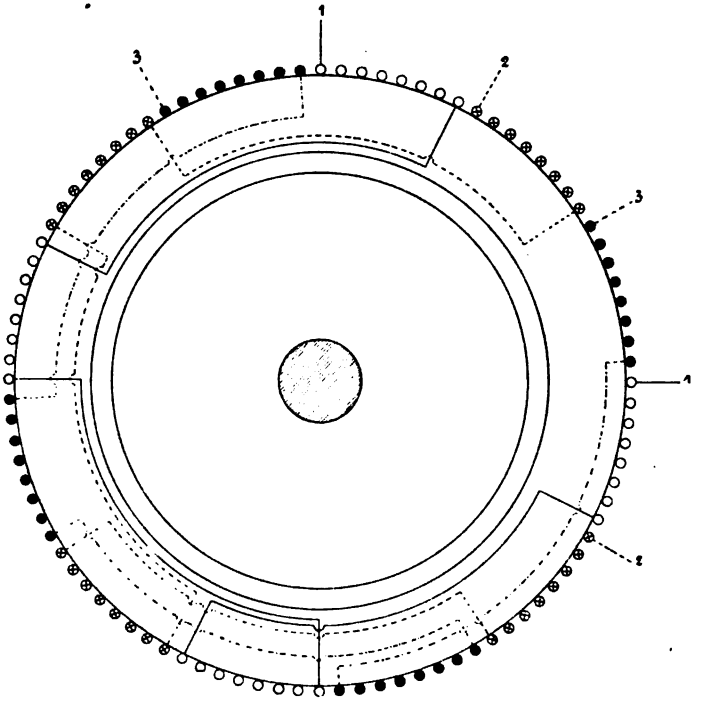


Fig. 175.

kann man, auf dieses Schema weiterbauend, eine fast vollständige Entwickelung aller gebräuchlichen Drahtverbindungsarten aufstellen.

Nachdem es wesentlich ist, dafs die gegenüberstehenden Mantelflächen des Feldes und des Ankers möglichst nahe aneinander gebracht werden, so kann man auch hier die innere Fläche des Feldringes gezahnt oder gelocht verwenden, wobei natürlich darauf Bedacht genommen werden mufs, dafs trotzdem die Querschnittsfläche des Eisens für den Kraftflufs ausreicht.

Schon wiederholt haben wir darauf hingewiesen, dafs und

wie in einem Drehfelde ein eiserner Körper oder Anker, der mit in sich selbst geschlossenen Ankerwickelungen versehen und drehbar gelagert ist, durch Induktion in den Drähten Ströme erhält, welche das Ankereisen magnetisieren und den Anker veranlassen, sich zu drehen. Wir nehmen an, dafs dem Anker kein Strom von aufsen zugeführt wird. Das Drehmoment des Ankers ist abhängig von der Zahl der in sich geschlossenen Windungen und der Stärke der induzierten Ströme, und letztere sind wieder abhängig von der Differenz der Umlaufszahlen von Drehfeld und Anker und dem Widerstande der Windungen. Würde der Anker die Umlaufszahl des Drehfeldes erreichen, so würde keine Induktion erfolgen. Die induzierte elektromotorische Kraft und die Stromstärke im Anker sind beim Angehen der Maschine und bei stillstehendem Anker verhältnismäfsig am gröfsten. Die Zugkraft, mit welcher der Anker aus der Ruhelage angeht, ist namentlich abhängig von der Phasenverschiebung der induzierenden gegen die induzierten Ströme. Nehmen wir an, der Anker habe keine Selbstinduktion, so beträgt die Phasenverschiebung genau 90°, und die Kraftmaschine wird nicht angehen; je gröfser die Selbstinduktion des Ankers, um so gröfser ist die Zugkraft beim Angehen. Ein Anker, dessen Selbstinduktionscoeffizient klein ist, erfordert zum Angehen eine sehr grofse Stromstärke. Die Ströme erreichen in diesem Falle eine so bedeutende Stärke, dafs durch die Rückwirkung derselben auf das Drehfeld das resultierende Magnetfeld nur eine geringe Stärke erreicht, infolgedessen wird im Stromkreise des Drehfeldes ein starker Spannungsabfall und ein übermäfsiges Anwachsen des Stromes verursacht, und die Zugkraft ist gering. Durch Einschalten von Widerständen in die Stromkreise des Drehfeldes oder des Ankers kann das starke Anwachsen des Stromes vermieden werden; hierdurch wird aber gleichzeitig die Anzugskraft herabgemindert. Wir werden später sehen, dafs durch geeignete Schaltung der Ankerspulen eine Zuhilfenahme von Widerständen vermieden werden kann.

Die A. E.-G. hat im Jahre 1888 (das bezügliche Patent Nr. 51083, datiert vom 8. März 1889) einen Anker für Drehstrom-Motoren gebaut, welcher eine ganz besondere Bedeutung in der Elektrotechnik erlangt hat. Man ging dabei von folgenden Erwägungen aus:

Beim Ferraris- und beim Bradley-Drehstrom-Motor schaltet

man zwei oder mehrere unter gewissem Winkel stehende, magnetisierende Spulengruppen derart, dafs sie einerseits von Wechselströmen verschiedener Phase durchflossen werden, und andererseits so, dafs sich das wirksame magnetische Feld in bestimmter Drehrichtung fortbewegt. Bringt man in dieses kreisende magnetische Feld einen leitenden Körper, z. B. einen Kupferzylinder, so gerät dieser infolge der Wechselwirkung des magnetischen Feldes und der im Zylinder induzierten Foucaultschen Ströme in Drehung. Es kann aber ein nach dieser Art gebauter Elektro-Motor keinen hohen Wirkungsgrad haben, obwohl den Foucault-Strömen eine gut leitende Bahn vorliegt, weil die Stärke des magnetischen Feldes nur gering sein wird; bei Verwendung eines Eisenkörpers dagegen ist zwar das magnetische Feld stark; indessen tritt hier der Übelstand auf, dafs die elektrischen Ströme vom Eisen viel schlechter geleitet werden als vom Kupfer und daher den Foucaultschen Strömen ein zu grofser Widerstand geboten wird.

Nun ist bekannt, dafs man die Wirkung der magnetisierenden Spirale verstärken kann, wenn man sie mit Eisenkernen versieht; eine Hauptsache bleibt jedoch immer jener Körper, in welchem die

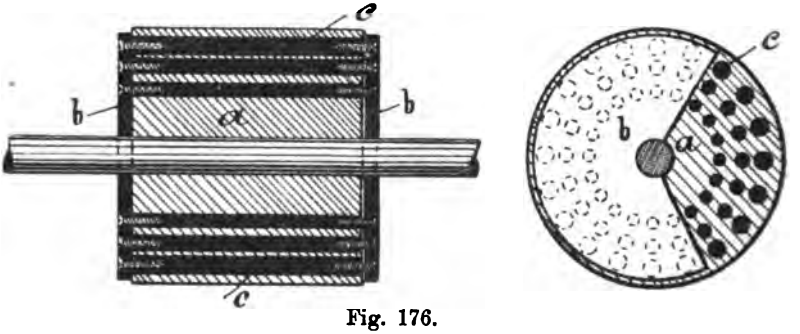


Fig. 176.

Foucault-Ströme induziert werden. Der Anker soll also im wesentlichen aus Eisen hergestellt sein, jedoch ist seine Masse von Kupferadern zu durchziehen, welche sämtlich miteinander, und zwar an beiden Enden, mittels Kupferplatten oder Ringen oder dergleichen in Verbindung gebracht werden. Die Fig. 176 und 177 zeigen einen solchen Anker in Form eines auf der Welle befestigten Eisenzylindsrs a; dieser Zylinder ist an vielen Stellen parallel der Achse durchbohrt, und in die so gebildeten Durchbohrungen sind

Kupferstangen *c* eingelegt. An beiden Endflächen des Zylinders sind Kupferscheiben *b* angebracht, welche sämtliche Enden der Stangen *c* elektrisch gut leitend verbinden. Bringt man solch einen Anker in das magnetische Feld, so wird durch die Eisenmasse die Feldstärke vergrößert; gleichzeitig aber können in den Kupferadern kräftige Foucault-Ströme kreisen, welche die magne-

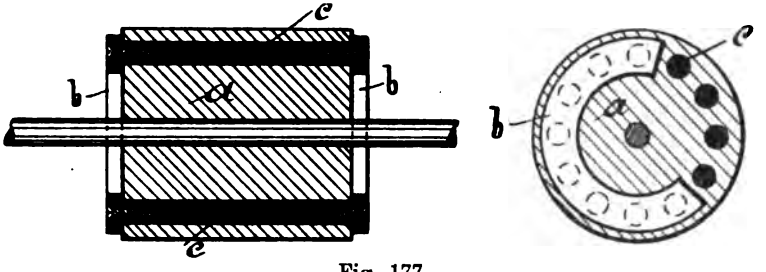


Fig. 177.

tische Trägheit des Ankers vergrößern und somit seine Mitnahme durch das Feld begünstigen.

Diese Anordnung, obwohl die günstigste, läßt sich jedoch durch andere verwandte mit mehr oder weniger Erfolg ersetzen. So z. B. brauchen die Kupferstäbe nicht ganz und gar in die Eisenmasse eingelegt zu werden, sondern können in Nuten, welche längs des Zylindermantels verlaufen, eingebettet werden (Fig. 178),

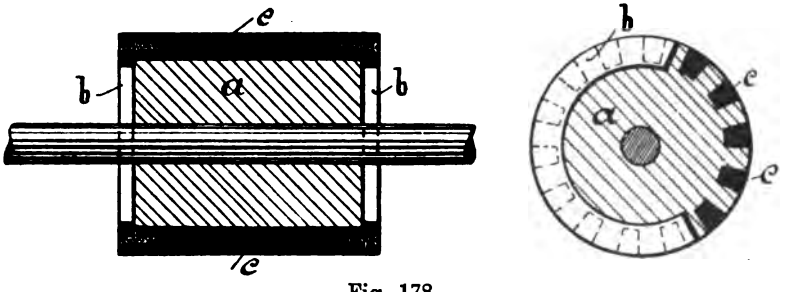


Fig. 178.

wobei aber immer für eine gut leitende Verbindung sämtlicher Stäbe an den Stirnflächen gesorgt werden muß.

Es kann auch der Eisenkörper größtenteils oder ganz mit Kupfer belegt werden, z. B. durch galvanische Verkupferung oder auf irgend einem anderen Wege. Bei allen derartigen Abänderungen braucht selbstredend die Eisenmasse nicht zerteilt zu sein, wie

auch die Isolierung des Kupfers vom Eisen ohne Bedeutung ist; es handelt sich nur darum, den Foucault-Strömen aufser dem Eisen selber noch eine bessere leitende Bahn zu bieten und dadurch die magnetische Trägheit zu vergröfsern. Auch ist die sonstige Anordnung des Elektromotors, ob er nämlich zwei oder mehrere Pole hat, ob der Anker aufserhalb oder innerhalb des magnetischen Systems sich befindet und welches von den beiden der kreisende Teil ist, für die beschriebene Neuerung gleichgültig. Die A. E.-G. hat damals folgenden Patentanspruch erhoben:

„Ein Anker für Elektromotoren, welche durch Wechselströme betrieben werden, bestehend aus einem beliebig geformten Eisenkörper, welcher entweder von Kupferadern irgend welcher Form (Draht, Band u. s. w.), deren Enden alle untereinander in leitender Verbindung stehen, durchzogen ist, oder der solche Kupferadern in Vertiefungen (Nuten) seiner Oberfläche enthält, die ebenfalls an ihren Enden untereinander leitend verbunden sind oder dessen Oberfläche teilweise oder ganz mit einer elektrisch zusammenhängenden Schicht bedeckt ist."

Wilhelm Lahmeyer in Frankfurt a. M., der sich schon 1891 — wie wir später erörtern werden — mit dem Baue von Drehstrom-Motoren beschäftigte, bestritt die Richtigkeit dieser Kalkulationen, indem er darauf hinwies, dafs durch die Kupferadern der Eisenquerschnitt verringert wird, was auch eine Verringerung der Leistung des Elektromotors mit sich bringt. Letztere ist nahezu proportional der Zahl der Kraftlinien, welcher den Anker aufzunehmen vermag, also vom Eisenquerschnitt sehr abhängig. W. Lahmeyer meint auch, dafs solche Motoren beim Angehen eine allzu bedeutende Stromstärke beanspruchen, und er proponierte 1893 folgende Konstruktion:

Er behauptet, Anker, lediglich aus Eisen, wenigstens für den im Bereiche der Kraftlinien liegenden Teil desselben seien am zweckmäfsigsten; man müsse aber einen höheren elektrischen Widerstand anbringen, als dies bei den bisherigen Eisenkernen der Fall war. Würde man dies durch Verminderung der Tiefe des Eisenkerns zu erreichen suchen, so wäre dadurch auch die Aufnahmsfähigkeit des Ankers für Kraftlinien und damit auch die Leistung des Motors vermindert. . Er kombiniert also massives mit unterteiltem Eisen:

Fig. 179 stellt im Längsschnitte einen derartigen Anker dar. Fig. 180 zeigt den Anker im Querschnitte.

Der zerteilte Teil des Ankers bildet den Eisenring *A* und dieser ist umgeben von dem massiven Mantel *B*. Die Stärke des Mantels *B* richtet sich nun nach der Leistung, die der Motor abgeben soll. Der massive Eisenmantel tritt seitwärts über den Wirkungsbereich der in der Zeichnung mit *NS* angedeuteten Pole

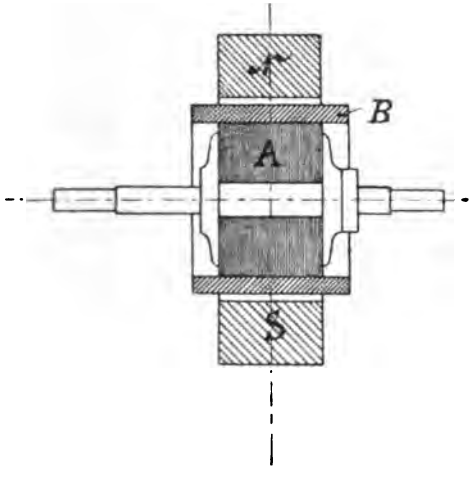


Fig. 179.

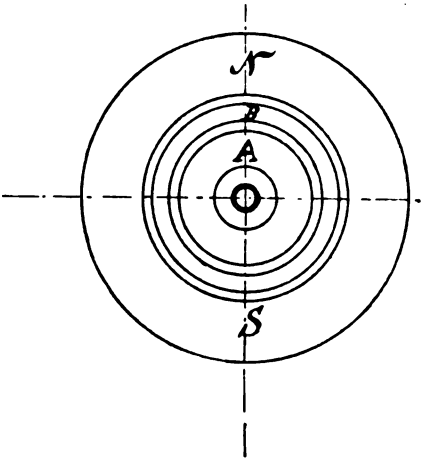


Fig. 180.

des induzierenden Ringes hinaus, um den in demselben entstehenden Strömen aufserhalb des magnetischen Feldes einen Weg zu geben, auf dem sie sich schliefsen können.

Die zur Aufnahme des zugeführten Stromes bestimmte Wickelung des Erregers *NS* ist in der Figur nicht dargestellt, da die besondere Ausführung derselben mit dem Grundgedanken der hier beschriebenen Konstruktion nicht zusammenhängt.

Der Zeichnung entsprechend ist der Mantel bestimmt zur Anbringung des Schlufsankers innerhalb des Erregers. Die entsprechende Konstruktion für einen äufseren Schlufsanker würde also derart sein, dafs der massive Eisenring innen und der zerteilte Eisenring aufsen wäre. Ob mit dieser Konstruktion wirklich bessere Resultate als mit den Ankern der A. E.-G. erzielt wurden, ist bis jetzt noch nicht bekannt geworden.

Die A. E.-G. hat dann ihren Anker bezw. den dreiphasigen

Drehstrom-Motor weiter entwickelt und stand 1891 auf folgendem Standpunkte:

Die Elektromotoren wurden nach dem Ferraris-Teslaschen Prinzipe gebaut, d. h. die verschiedenen mehrphasigen Ströme erzeugen ein rotierendes magnetisches Feld von nahezu konstanter Intensität, und dieses „Drehfeld" zwingt den Anker mit in sich geschlossener Wickelung oder entsprechender Anordnung seine Rotation mitzumachen. Je nach dem Zwecke der speziellen Bedingungen und der Gröfse erhalten die Motoren verschiedene Anordnung. Ganz kleine Motoren (bis zu $^1/_4$ PS) wurden nach dem Schema Fig. 181 gebaut. Es bedeutet *M* einen aus Eisenblechscheiben aufgebauten Magnetring, der, etwa nach Pacinottischer

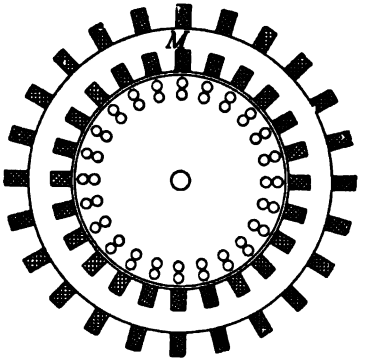


Fig. 181.

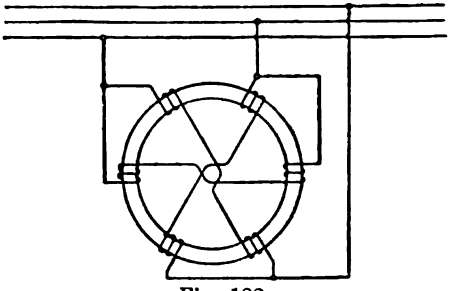


Fig. 182.

Art, (jedoch nach innen) vorstehende Eisenzähne besitzt. Die Wickelung wird nach Grammescher Art ausgeführt und füllt die Zwischenräume der Zähne aus. Das Wickelungsschema, falls verketteter Drehstrom angewendet wird, ist in Fig. 182 dargestellt. Der Anker besteht aus einem massiven Eisenzylinder mit zahlreichen Durchbohrungen parallel zur Achse, durch welche Kupferdrähte gezogen werden, die wiederum durch zwei Endplatten oder Ringe aus Kupfer gut leitend miteinander verbunden werden. Die Fig. 176 bis 178 (Seite 234) zeigen uns die Anordnung dieses Ankers.

Eine Stromzuführung zu diesem Anker ist nicht erforderlich. Besonders wertvoll ist diese Einfachheit gerade bei den kleinen Motoren, welche unmittelbar in die Hände des Laien kommen. Das Anlassen geschieht, falls ein Wechsel der Drehungsrichtung

nicht erforderlich ist, einfach durch Stromschluſs, wozu die A. E.-G. einen sehr einfachen und kompakten Ausschalter anfertigt, welcher sämtliche drei Stromkreise auf einmal unterbricht resp. schlieſst. (Fig. 183.)

Sollen die Motoren in ihrer Drehungsrichtung umgesteuert werden, so bedient man sich eines einfachen Umschalters, dessen

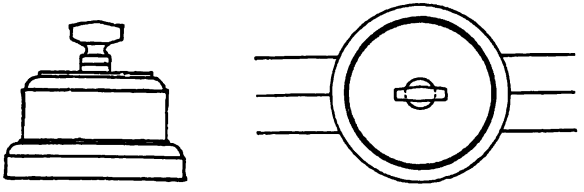


Fig. 183.

Wirkungsweise schematisch in Fig. 184 dargestellt ist. Wie wir sehen, werden durch den Umschalter die Leitungen 1 und 2 in Bezug auf den Motor gewechselt, so daſs aus der Reihenfolge 1 2 3 1 2 3 1 etc. die Folge 3 2 1 3 2 1 3 etc. wird. Da letztere umgekehrt gegen die erstere ist, so kehrt sich auch die Drehungsrichtung des Motors um. Erhalten gröſsere Motoren mehr als drei Phasen, so wird natürlich auch der Umschalter entsprechend gestaltet.

Wenn es nicht darauf ankommt, Motoren für besonders hohe Spannungen zu bauen, sondern zum Antriebe derselben, wie

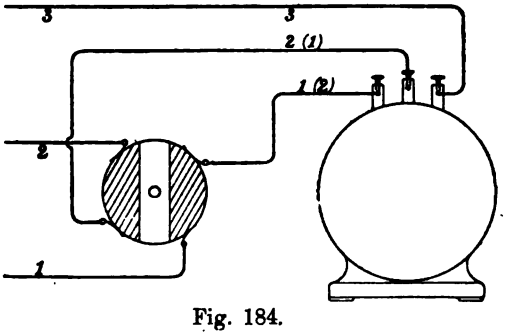


Fig. 184.

z. B. bei Stromverteilungen in Städten, der bereits niedrig gespannte Strom (von vielleicht 100 V) zur Verfügung steht, so empfiehlt es sich, besonders für Motoren von über 1 PS, eine andere Motorentype zu verwenden, welche eine nochmalige Transformation vermeidet. Bei der Ausarbeitung einer solchen Type

war das Augenmerk hauptsächlich darauf gerichtet, einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen, da meistens die Energie von dem Konsumenten nach Angabe des Wattzählers, und zwar nicht selten teuer, bezahlt werden mufs. Wie uns Fig. 185 zeigt, ist die Anordnung im wesentlichen eine Umkehrung des Motors in Fig. 181. Der Magnet *M* befindet sich innen und ist drehbar, während der Schlufsanker *N* nach aufsen genommen ist und feststeht. Dementsprechend wird der Magnet meistens mit einer Art Trommelwickelung versehen, wodurch die zur Erzielung eines gegebenen Magnetismus nötige Drahtlänge verringert wird. Auch wird jetzt der Anker meistens nicht mehr massiv gemacht, sondern aus Eisenscheiben aufgebaut; es wirkt somit nur die in sich geschlossene Kupferwickelung treibend, statt wie oben auch die Foucault-Ströme im Eisen, die sehr schwer zu lenken und zu berechnen sind. Freilich hat diese Type den Nachteil, dafs bewegliche Stromzuführungen zum Magnet, dem bewegten Teile, erforderlich sind; da aber die Stromaufnehmer einfache, glatte Schleifringe ohne jede Unterbrechung sind, so ist eine Funkenbildung naturgemäfs ausgeschlossen, und irgendwelche Bedienung ist nicht erforderlich. Motoren von dieser Bauart haben den Vorteil, dafs der Elektromagnet bei gleichem Eisenquerschnitt und gleicher Oberfläche viel weniger Masse, also viel weniger Hysteresis hat als ein Magnet, welcher um den Anker herum angeordnet ist. Dagegen spielt die Hysteresis des Ankers, welcher nur so viel Polwechsel erleidet, als seine Tourenzahl hinter der theoretischen (von der Wechselzahl abhängigen) zurückbleibt, gar keine Rolle.

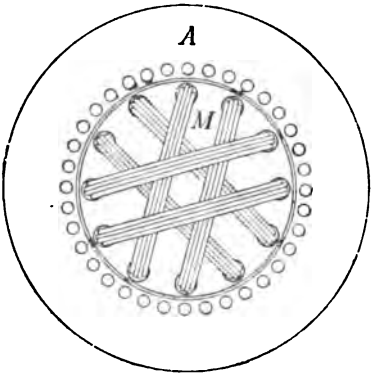


Fig. 185.

Dafs bei einem solchen Dreiphasen-Drehstrom-Motor das Feld gleichmäfsiger rotiert, ist aus dem Studium der Fig. 154 bis 161 Seite 218 und dem Diagramme Fig. 87 und 90 Seite 127 und 129 leicht zu ersehen. Wir haben hier denselben Fall, wie bei Dampfmaschinen, von denen die eine als Zwilling, die andere aber mit drei um 120° versetzten Kurbeln betrieben wird.

W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M. haben schon 1891 für Drehfeld-Kraftmaschinen einen besonderen Anker konstruiert und sind dabei von folgenden Erörterungen ausgegangen:

Bringt man in das Feld einer „Drehfeld-Kraftmaschine" einen leitenden Körper, so wird derselbe bekanntlich durch die entstehenden Wirbelströme mitgenommen. Damit die ihm erteilte Zugkraft eine möglichst starke wird, ist es nötig, den auf ihn wirkenden magnetischen Kraftlinien des Drehfeldes Eisen, hingegen den in ihm sich bildenden Wirbelströmen Kupfer zum Wege zu geben; denn die Zugkraft hängt sowohl von der Stärke des auf ihn wirkenden Feldes ab, als auch von der Stärke der dadurch erzeugten Wirbelströme, und die letztere ist umgekehrt proportional dem Widerstande der ihnen gebotenen Kupfermasse, bezw. Kupfer- und Eisenleitung.

Diesen Widerstand möglichst gering zu machen, indem gleichwohl die nötige Eisenmenge in günstiger Weise den Kraftlinien als Bahn gelassen wird, bildet daher den Grundgedanken des Ankeraufbaues.

Die Wirbelströme denken wir uns bekanntlich als Kreise um die Kraftlinien herum. Der Weg, den sie nehmen, soll durch Kupfer führen. Damit der Widerstand desselben ein geringer ist, muſs diese Kupferleitung bei möglichst groſsem Querschnitt des Eisens, welches sie umfaſst, eine möglichst kurze sein, und auſserdem darf sie keine Fuge enthalten.

Es empfiehlt sich daher, der Eisenleitung für die Kraftlinien einen runden Querschnitt zu geben.

Der Aufbau des Lahmeyer-Ankers besteht nun darin, daſs ein Kupferring zwischen zwei Eisenringen eingebettet wird und quer durch das Kupfer hindurch von einem Eisenring zum anderen runde eiserne Bolzen gezogen werden. Der erste Eisenring ist schwach gehalten, dem Drehfelde unmittelbar zugekehrt und dient im wesentlichen zum Aufsaugen der Kraftlinien der wandernden Pole des Drehfeldes. Von diesem Ringe führen nun die eisernen Bolzen die Kraftlinien quer durch den Kupferring hindurch zu dem anderen Eisenringe. Dieser letztere ist stark bemessen und dient als magnetischer Rückschluſs für die Kraftlinien zwischen den einzelnen Bolzen. Jeder Bolzen ist auf diese Weise von einem fugenlosen Kupferring umgeben, der von den Kraftlinien gekreuzt wird, wenn eine Abweichung des Synchronismus zwischen Anker

und Drehfeld stattfindet. Der entstehende Wirbelstrom ist natürlich bei diesem Aufbau aufserordentlich stark, denn der Weg im Kupfer ist kurz. Der Querschnitt des Kupfers kann, wie bei den einzelnen Abänderungen des Aufbaues gezeigt werden wird, sehr grofs genommen werden, und die Kupferleitung enthält keine Fuge.

Fig. 186 und 187 zeigen in Längs- und Querschnitt einen derartig zusammengesetzten Ringanker für ein von innen radial

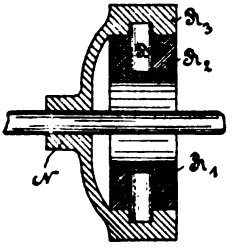


Fig. 186.

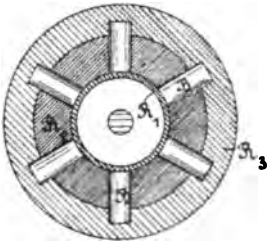


Fig. 187.

wirkendes Drehfeld. R_1 ist der schwache Eisenring, welcher zum Aufsaugen der Kraftlinien des Drehfeldes dient; R_2 ist der massive Kupferring, R_3 der starke Eisenring, welcher zum Rückschlufs der Kraftlinien dient. Die Bolzen B sind in Richtung der wirksamen Kraftlinien des Drehfeldes, also radial zur Verbindung der beiden Eisenringe angeordnet. Während man diese Bolzen gern aus Schmiedeisen nehmen wird, um bei grofser Fähigkeit, magnetische Kraftlinien aufzunehmen, doch einen möglichst geringen Durchmesser zu behalten, kann R_3 ohne Bedenken aus Gufseisen hergestellt werden, da einer grofsen Abmessung dieses Ringes nichts im Wege steht. An R_3 kann man, wie Fig. 186 zeigt, eine Scheibe oder Speichen anschliefsen lassen, welche an der Nabe N festsitzen. Es ist dadurch ein derartig fester Aufbau ermöglicht, dafs R_3 ohne weiteres auch als Riemscheibe verwendet werden kann. Den Kupferring R_2 kann man seitlich beliebig stark nehmen und daher einen grofsen Querschnitt der Kupferleitung erzielen, ohne zur Beschränkung der Abmessungen der Bolzen B genötigt zu sein.

Fig. 188 und 189 stellen in Längs- und Querschnitt die Abänderung des Aufbaues für ein äufseres, radial einwirkendes Drehfeld dar. Die Lage der beiden Ringe R_1 R_3 ist daher vertauscht

und R_2 unmittelbar mit der Nabe N verbunden. Die Bolzen B stehen wieder radial, genau so wie die Richtung der eintretenden Kraftlinien.

Fig. 190 zeigt zwei symmetrisch gleiche Anker zu beiden Seiten eines Drehfeldes achsialer Richtung der Krafteinwirkung, bei denen die Bolzen B somit parallel zur Achse und die Ring-

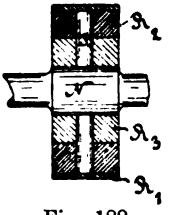


Fig. 188.

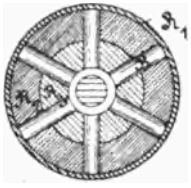


Fig. 189.

ebenen senkrecht zu Bolzen und Achse angeordnet sind. NS ist das Gestell des Drehfeldes. Die übrigen Bezeichnungen sind jenen der vorhergehenden Figuren entsprechend.

Fig. 191 zeigt den Querschnitt eines derartigen Ankers durch einen der Kupferringe hindurch, so dafs gleichzeitig die Bolzen B im Querschnitt sichtbar sind. Letztere bilden zusammen, wie Fig. 191 zeigt, einen Ring. Man kann natürlich mehrere solcher Ringe nebeneinander anordnen, ebenso wie man in den

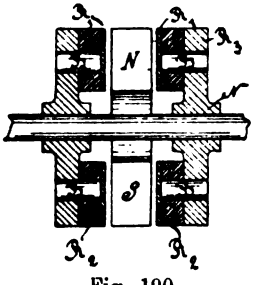


Fig. 190.

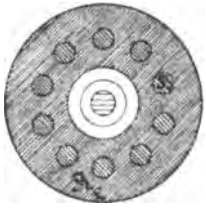


Fig. 191.

beiden vorhergehenden Figuren, wo die Bolzen strahlenförmig angeordnet sind, mehrere Reihen solcher Bolzen anwenden kann.

Bei allen beschriebenen Konstruktionen des Ankers ist die Abänderung möglich, dafs man statt des einen durchgehenden Kupferringes ebenso viele Kupferringe verwendet, wie Bolzen in dem Ankeraufbau vorhanden sind, und je einen dieser Kupferringe über je einen der Bolzen überschiebt.

Die Fig. 192 und 193 zeigen uns vollständige Drehstrom-Motoren für Dreiphasenstrom, wie solche Maschinen derzeit in den Werkstätten der A. E.-G. in Berlin gebaut werden. Das Feld ist durch ein eisernes Gehäuse geschützt, dessen Wand teilweise durchbrochen ist. Die Durchbruchstellen sind mit gelochtem Blech bedeckt. Der Anker sitzt auf einem Speichenrad, welches auf einer Achse aufgekeilt ist. Der Lagerbock ist am oben

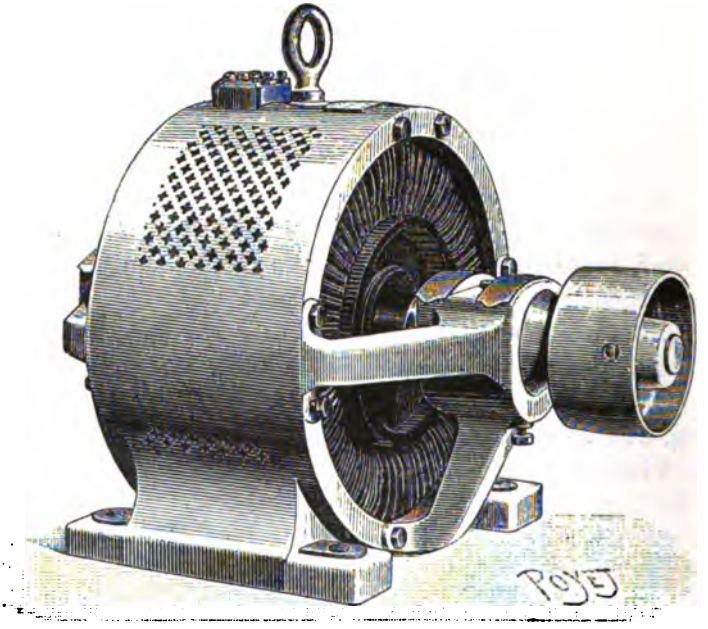


Fig. 192.

erwähnten Gehäuse befestigt und hat Ringschmierung. Die Multiplikation des Feldes endigt in drei am Schutzgehäuse angebrachten Klemmen.

Bezüglich Tourenzahl pro Minute, Wechsel und Polzahl besteht, wie bei allen solchen Motoren, die Relation:

$$\frac{n}{60} = \frac{\text{Wechsel}}{\text{Polzahl}}.$$

Aus vorstehender Formel ersehen wir auch, dafs die Tourenzahl von ziemlich konstanten Faktoren abhängt und eine Änderung der Tourenzahl bei so gebauten Motoren demnach nur

durch mechanische Mittel erreicht werden kann. Man könnte Änderungen der Tourenzahl bei mehrpoligen Motoren auch durch Änderungen der Polzahl erreichen, ohne dafs vorläufig dieses Mittel der praktischen Verwendung besonders empfohlen wird. Sonst aber bieten solche Elektromotoren ganz bedeutende Vor-

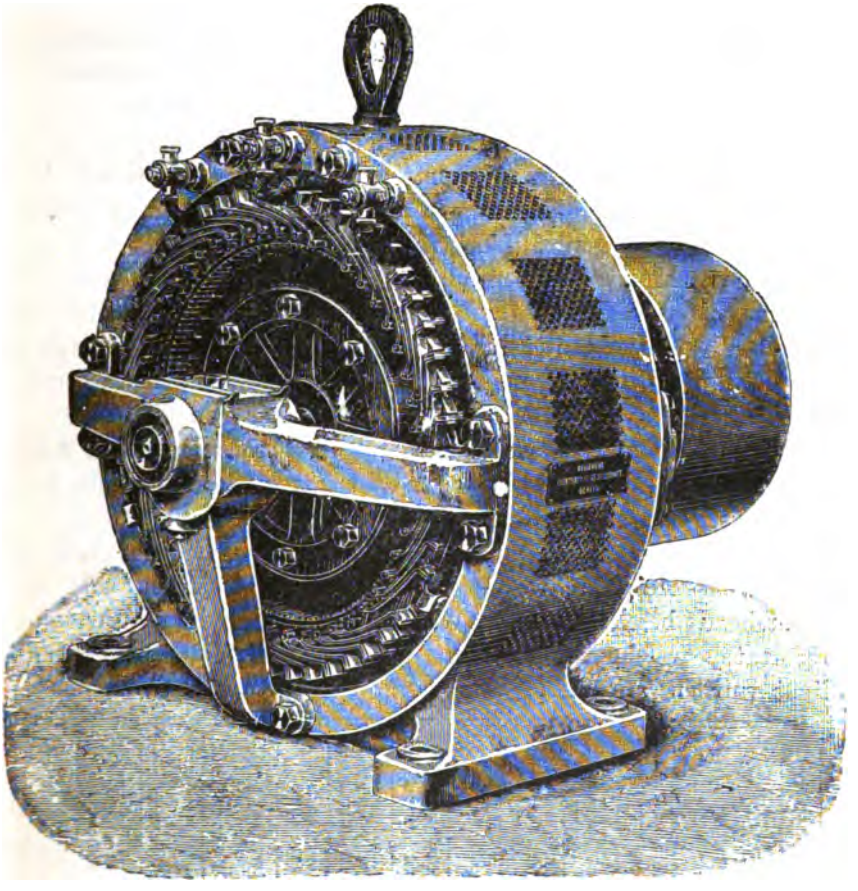


Fig. 193.

teile: Sie gehen sogar mit Überlast an und vertragen auch während des Betriebes wesentliche Überlastungen, ohne dafs ihre gute Funktion beeinträchtigt wird, sie haben keine schleifenden, funkengebenden Kontakte und bedürfen daher aufser der Lagerölung gar keiner Wartung noch Pflege. Alle Teile sind gut geschützt; Schrauben und Muttern sind möglichst vermieden; auch

ein Lockern der Leitungsdrähte ist nicht zu fürchten, so daſs solche Motoren eigentlich gar keiner Abnutzung unterliegen, und es ist nicht abzusehen, daſs dieselben auſser in den Lagern irgendwo reparaturbedürftig werden könnten.

In Chicago 1893 hatte die A. E.-G. einen Dreiphasen-Motor nach der in Fig. 193 Seite 245 abgebildeten Form aufgestellt. Derselbe hatte acht Pole, leistete 50 PS und machte 750 Umdrehungen in der Minute. Der Feldmagnet trug $3 \times 34 = 102$ Kupferleiter, welche zu drei achtpoligen Trommelwickelungen vereinigt wurden. Sind die Leiter fortlaufend numeriert, und läſst man z. B. bei 102 den Strom I eintreten, so ist die Wickelung so gestaltet, daſs man immer um 13 Stäbe entgegen der Uhrzeiger-Bewegung zurückgeht. Umkreist man auf diese Weise den Feldmagnet $4^1/_3$ mal, so kommt man zum Leiter 83, wo das Ende mit dem Kerne des Feldmagneten verlötet ist. Man hat auf diese Weise die oben erwähnten 34 Leiter hintereinander geschaltet. Die Analogie ergiebt dann für den Strom II die Leiter 34 über je 13 bis zum Leiter 15, und für Strom III die übrigbleibenden Leiter von 68 bis 49.

Im Anker waren zwei Reihen Kupferstäbe eingelassen, deren Höhenabstand ca. 2 cm betragen hat, und die natürlich kurz geschlossen bezw. parallel geschaltet waren.

Die Fabrik „Oerlikon“ baut als Lizenzträgerin der A. E.-G. Drehstrom-Motoren, welche dem Wesen nach gleich sind den vorstehend beschriebenen. Wir wollen hier einige Versuchsresultate, welche von „Oerlikon“ über solche Motoren veröffentlicht wurden, anfügen:

Effektive Leistung der Motoren	Periodenzahl	Touren per Minute bei Leerlauf	Touren per Minute bei Vollbelastung	Durchmesser d. Riemenscheibe	Maximale Zugkraft beim Angehen	Zugkraft beim Angehen äquivalent der Vollbelastung	Schenkelspannung	Stromstärke per Kreis bei Leerlauf	Stromstärke per Kreis bei Normalbelastung (Kol. 13)	Energieverbrauch bei Leerlauf	Energieverbrauch bei Normalbelastung (Kol. 13)	Normalleistung während der Dauerprobe von 4 Stunden	Normalleistung während der Dauerprobe von 4 Stunden	Kommerzieller Wirkungsgrad bei Normalbelastung (Kol. 13)	Gewicht des kompletten Motors
PS				mm	kg	kg	Volt	Amp.	Amp.	Watt	Watt	PS	Watt	%	kg
$^1/_4$	50	1450	1320	78	8	3,5	60,5	1,3	2,5	105	325	0,23	170	52	42
$^1/_2$	50	1450	1335	88	9	6,1	60	4	8	—	670	0,49	368	55	60
$1^1/_2$	50	1450	1350	104	19	15,3	57	7	13,8	346	1900	1,5	1104	60	100
3	50	1475	1380	190	17	16,5	63	7,5	18	404	2940	3	2208	75	150
6	50	975	910	240	80	37,5	61	20	59	—	6620	7,1	5300	80	275
9	50	970	900	240	95	60	67	25	86	—	10400	11,5	8600	83	420

Die Drehstrom-Motoren von Siemens & Halske sind in ähnlicher Weise ausgeführt wie jene der A. E.-G.; sie unterscheiden sich von den Konstruktionen der letzteren nur durch die Wickelung der Anker, deren Drahtanordnung genau so ausgeführt ist, wie die Wickelung der das Feld erregenden Elektromagnetringe. Während nun die Ankerwindungen bei den Motoren der A. E.-G. nach deren Patent einfach kurz geschlossen sind, verbinden Siemens & Halske bei den kleineren Motoren die Enden der drei Wickelungsgruppen nach der Sternschaltung, bei den gröfseren Motoren führen sie aber die drei Doppelenden zu drei Schleifringen, von denen Leitungen zu drei entsprechenden Gruppen von Anlafswiderständen führen. Diese drei Gruppen sind unter allen Verhältnissen gleich grofs und sternförmig geschaltet. Die Anwendung dieser Widerstände ist fast dieselbe wie bei Nebenschlufs-Gleichstrom-Motoren; je mehr von diesen Widerständen ausgeschaltet wird, desto mehr wächst die Stromstärke und damit auch die Zugkraft (Fig. 166 Seite 223 und Fig. 227 Seite 288).

Siemens & Halske geben bezüglich Leistung, Wirkungsgrad u. s. f. ihrer Motoren folgende Tabelle:

Leistung in PS:	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Wirkungsgrad:	0,50	0,68	0,83	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87.

Ferner:

Perioden: 50 in der Sekunde,

Betriebsspannung: 110 bis 120 Volt,

Cosinus φ: 0,7 bis 0,8,

Stromstärke beim Leerlauf: ca. $^1/_3$ bis $^1/_2$ der Stromstärke bei Vollbelastung.

Um eine bestimmte Zugkraft in solchen Drehstrom-Elektromotoren zu erzielen, ist bei gegebener Klemmenspannung eine ganz bestimmte Stromstärke in jenem Teile der Wickelung nötig, welche den Anker umgiebt, und wollen wir diesen Teil die induzierte Wickelung nennen. Die Stromstärke in letzterer entspricht nach dem Ohmschen Gesetze der induzierten elektromotorischen Kraft, dividiert durch den Widerstand des zugehörigen Stromkreises. Je gröfser dieser Widerstand ist, um so gröfser mufs die elektromotorische Kraft sein, wenn die Stromstärke im induzierten Teile, und somit auch die Zugkraft unverändert bleiben soll.

Die elektromotorische Kraft ist aber proportional der Differenz

der wirklich vorhandenen und der dem Synchronismus entsprechenden Umdrehungszahl. Schaltet man nun in den Stromkreis Widerstand ein, so schwächt man dadurch die Stromstärke und damit auch die Zugkraft; der Motor vermindert seine Tourenzahl, wodurch der Tourenabfall zunimmt, weswegen die elektromotorische Kraft proportional wächst, und zwar soweit, bis die Stromstärke wieder ihren früheren Wert erreicht hat.

Die Einschaltung von Widerstand in die Haupt- d. i. jene Leitung, welche das Feld erregt, würde aber keinen günstigen Erfolg haben. Die Zugkraft kann ungefähr direkt proportional dem Quadrate der am Motor herrschenden Klemmenspannung angesehen werden. Durch Einschaltung von Widerstand an dieser Stelle würde aber ein Spannungsverlust und somit auch eine Verminderung der Zugkraft eintreten. Nun ist ferner zu berücksichtigen, dafs die prozentuale Differenz zwischen der Umdrehungszahl, die dem Synchronismus entsprechen würde, und der wirklich vorhandenen Umdrehungszahl (d. i. die Schlüpfung) auch dem prozentualen Energieverluste entspricht, der durch die induzierten Ströme verursacht wird. Beträgt z. B. die Schlüpfung 3%, so ist auch der Energieverlust in den Windungen und der Eisenmasse des Ankers mit 3% zu beziffern. Auch hier ist es also eine natürliche Folge des Einschaltens von Widerständen, dafs in denselben Energie bezw. nutzlos aufgezehrt wird. Man hat verschiedene Mittel versucht, diese Energieverluste zu umgehen.

Bei Gleichstrom-Motoren kann man, wenn zum gleichen Zwecke zwei solcher Maschinen angewendet werden (wie z. B. bei elektrischen Eisenbahnen) mittels Schaltungen helfen. Parallel geschaltet haben die Motoren volle Tourenzahl, hintereinander geschaltet nur halbe Tourenzahl, weil jeder nur ungefähr die halbe Spannung erhält. Bei Drehstrom-Motoren ist dieses Mittel aber nicht anwendbar, denn in diesem Falle würde die Hintereinanderschaltung zweier Drehstrom-Motoren die Zugkraft auf ein Viertel des normalen Wertes herabsetzen. Auch hier würde bei der Hintereinanderschaltung jeder Motor nur ungefähr die Hälfte der Spannung erhalten; proportional würde aber auch der Magnetismus, und quadratisch proportional zur Spannung die Zugkraft vermindert.

Auf welche Weise man schliefslich doch abzuhelfen gesucht hat, soll später gezeigt werden.

M. M. Rotten in Berlin hat 1891 ein Patent auf eine eigentümliche Drehfeld-Treibmaschine mit massivem Scheibenanker zwischen Flachringen erhalten und wenn auch nicht bekannt wurde, ob dieselbe in der Praxis Eingang gefunden hat, so bietet diese Konstruktion doch eine interessante Type. Es unterliegt keinem Zweifel, dafs bei Drehfeld-Motoren, welche mit Strömen hoher Wechselzahl gespeist werden, und die aus diesem Grunde vielpolig gebaut werden müssen, immer die Gefahr naheliegt, dafs die Kraftlinien im Ringe selbst verlaufen und nicht gerne in den Luftraum austreten. Man mufs daher, um diesem Übelstande zu begegnen, dem Ringe einen möglichst geringen Querschnitt geben, was aber auf die Erzeugung des Feldes wesentlichen und nicht gerade fördernden Einflufs ausübt.

Rotten behauptet nun, dafs die Kraftlinien viel leichter aus dem Eisen heraustreten, wenn man conachsial einen zweiten gleichen Ring gegenüber stellt, jedoch so, dafs jedesmal entgegengesetzte Pole beider Ringe einander gegenüber stehen. Diese Pole werden sich gegenseitig unterstützen und es wird sich zwischen beiden, wenn die Schaltung der Erregerspulen pafst, ein kräftiges Drehfeld entwickeln.

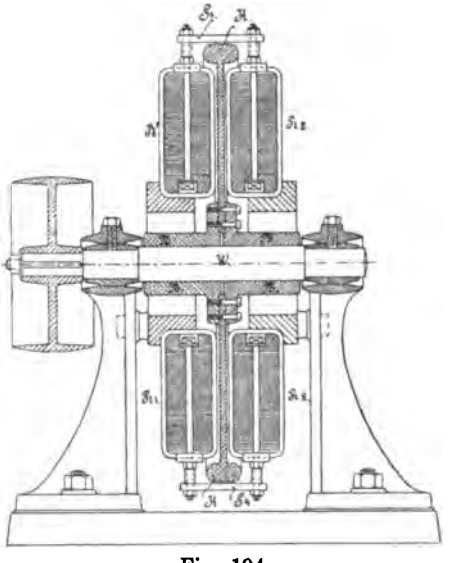


Fig. 194.

Stellt man zwischen die beiden Ringe eine Kupferscheibe, so werden in dieser bei der Drehung des Feldes radial teils nach aufsen, teils nach innen gerichtete Kraftströme auftreten, welche sich einerseits im Mittelpunkte, andererseits am Anfange ausgleichen, indem sie eine kurze Zeit an der Scheibe entlang laufen und ihr so ein Drehmoment im selben Sinne, wie das magnetische Feld läuft, erteilen.

Eine nach diesem Grundgedanken gebaute Maschine ist in

der Fig. 194 (Seite 249) im Schnitt dargestellt, während die Fig. 195 eine Ansicht einer Ausführungsform der Kupferscheibe und die Fig. 196 eine Ausführungsform des mit der Wickelung versehenen Ringes zeigen.

Die beiden einander vollkommen gleichen Ringe R' und R'' sind mit irgend einer Drehstromwickelung versehen und einerseits mit dem Gestell der Maschine fest verbunden, andererseits durch Streben $S' \ldots . S^6$ entgegen den magnetischen Kräften in einer bestimmten Entfernung von einander gehalten. Zwischen ihnen

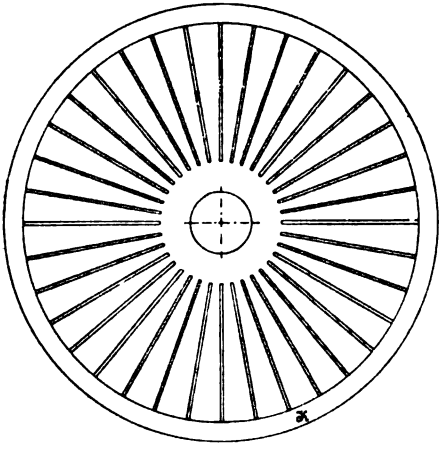


Fig. 195.

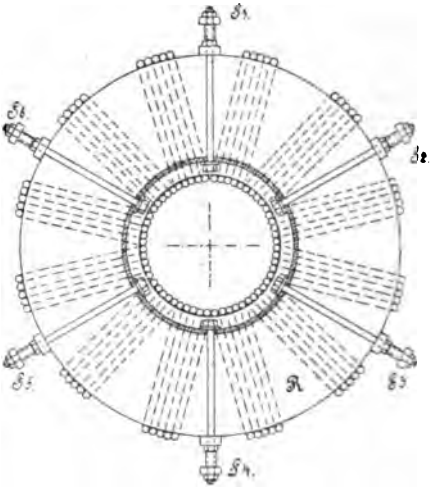


Fig. 196.

ist drehbar um die Welle W die Kupferscheibe angebracht, welche mit der gut leitenden Nabe N fest verbunden ist und aufsen einen Wulst K hat, um die am Umfange verlaufenden Ströme gut leiten zu können.

Die Ringe R' und R'' können auch mit Zähnen versehen werden, in deren Lücken die Wickelungen sich befinden. Ferner kann die Kupferscheibe in mannigfacher Weise hergestellt werden, entweder massiv (Fig. 194) oder mit radialen Speichen (Fig. 195), welche nur durch Nabe und äufseren Kranz zusammen gehalten werden und leitend miteinander verbunden sind. Statt der Kupferscheibe kann auch eine Scheibe von massivem Eisen mit gutleitender Nabe, etwa aus Rotguſs und mit Kupferkranz angewendet, oder es können die Speichen aus Eisen hergestellt werden.

Endlich können auch die dem Einflusse der Kraftlinien ausgesetzten Teile der Scheibe teilweise aus Kupfer und Eisen bestehen.

Die Anordnung kann auch derart getroffen werden, dafs man die Scheibe feststellen und die Ringe drehen läfst.

Bei derselben Treibmaschine kann man eventuell eine Regelung der Zugkraft auf die Thatsache gestützt vornehmen, dafs in der Kupferscheibe keine Ströme induziert werden können, wenn sich in den beiden Ringen R' und R'' gleichnamige Pole gegenüberstehen. Verstellt man also durch irgend eine Vorrichtung die Lage der Pole in den Ringen R' und R'', so mufs die Zugkraft wachsen, je mehr man sich der zweiten Endlage der Pole nähert, in welcher ungleichnamige Pole einander genau gegenüberstehen. Die Verstellung der magnetischen Achsen der beiden Ringe gegeneinander kann entweder durch eine mechanische Verdrehung der Ringe gegeneinander oder durch Umschaltung vorgenommen werden.

Die Fig. 173 und 174, Seite 231, zeigen uns die Grundschemata, nach welchen die Feldmultiplikationen dreiphasiger Drehstrom-Motoren geschaltet werden.

Ein Hauptzweck der Schaltung ist es wohl, Drehfelder zu erzeugen, deren Stärke und Winkelgeschwindigkeit möglichst konstant bleibt, weil Änderungen jener beiden Faktoren Stöfse auf die zugehörige Dynamo ausüben, was die letztere ungebührlich erwärmt.

Nun ist bekannt, dafs die Konstanz der Intensität des Feldes durch jede Vermehrung der zusammenwirkenden magnetischen Felder erhöht wird; Ferraris und Tesla verwendeten zwei in der Phase verschobene Wechselströme und vier Spulen, Dobrowolsky nahm drei solche Ströme und sechs Spulen und sie erreichten dadurch eine Verdoppelung der Anzahl der zusammenwirkenden Felder.

M. M. Rotten in Berlin proponierte (nach einer Patentschrift von 1891) folgende Schaltungsweise:

Fig. 197 (Seite 251) zeigt zwei Ringe A und S, welche in der gewöhnlichen Weise wie Gramme-Anker ausgebaut und bewickelt sind. A ist aber nach der von Dobrowolsky angegebenen dreiteiligen Verbindung geschaltet, während S genau einem Grammeschen Anker entspricht, also auch mit einem Kollektor

ausgestattet ist. Mittels der Bürsten B_1 B_2 B_3 werden die dreiphasigen Ströme zugeführt.

Betrachten wir die Wirkung der letzteren, so wird klar, daſs dieselben sowohl A als auch in S je eine magnetische Achse erzeugen werden, und daſs es eine Bürstenstellung geben muſs, wo beide Achsen in der Richtung zusammenfallen und daher kein

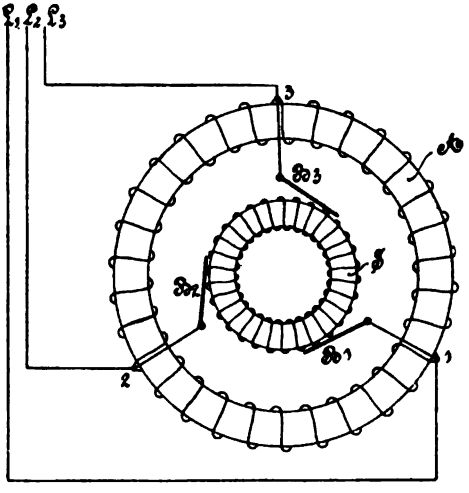


Fig. 197.

Drehmoment zu erwarten ist. Dasselbe gilt bei der gleichen Anordnung Fig. 198, wobei nur in den Drahtverbindungen eine Änderung erfolgt ist.

Verschiebt man aber die Bürsten aus der vorerwähnten Lage, so werden bei wirkenden Strömen die erzeugten magnetischen Achsen einen Winkel bilden und das gewünschte Drehungsmoment ist erreicht.

Die Firma „Helios“ hat auch schon 1889 eine eigentümliche Wechselstrom-Kraftmaschine konstruiert, welche aus einem Umformer und einer Kraftmaschine zusammengesetzt gedacht werden kann, so zwar, daſs diese beiden Teile periodisch ihre Rollen wechseln. Eine solche Anordnung macht die Einführung des Stromes durch einen Stromwender und Bürsten unnötig.

Die wesentlichen Teile dieser Maschine sind:

Ein Anker mit in sich geschlossenen Bewickelungen, welcher auch als aus zwei Ankern T T' in Fig. 1 und 2, Tafel IX,

zusammengesetzt bezeichnet werden kann, deren Bewickelungen durcheinander geschlossen sind, und zwei Feldmagnete M' und M'', die durch zwei in ihren Phasen gegeneinander verschobene Wechselströme erregt werden und deren Polaritätsachsen einen Winkel miteinander bilden, ohne sich jedoch zu schneiden. Hierdurch unterscheidet sich diese Anordnung von denen Teslas und Ferraris, da bei diesen die Felder sich in der Masse des Ankers schneiden. Hierbei ist eine jede Spule der einen Ankerhälfte durch eine Spule der anderen Ankerhälfte geschlossen. Um die Wirkungsweise der Kraftmaschine erklären zu können, betrachten

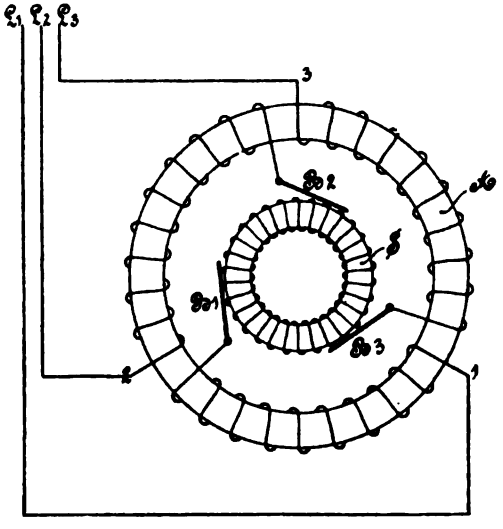


Fig. 198.

wir nur die Spulen 1 und 2 in Fig. 3, Tafel IX, und nehmen an, dafs der Anker steht. Ist der Strom von M', also auch der Magnetismus desselben gegen den Strom bezw. gegen den Magnetismus von M'' um einen bestimmten Teil der Wellenlänge, z. B. um $^1/_4$ verschoben, so wird auch der von M' in der Spule 2 induzierte Strom gegen den von M'' in der Spule 1 erzeugten um $^1/_4$ Wellenlänge verschoben sein. Da ferner die Phasen der Ströme in 1 und 2 gegen die Phasen der sie induzierenden Felder M'' und M' wieder um annähernd $^1/_4$ Wellenlänge verschoben sind, so wird das maximale Drehmoment des Feldmagneten M' auf die Spule 1 mit dem Drehmoment gleich Null des Feld-

magneten M'' auf die Spule 2 zusammenfallen, und umgekehrt, d. h. die Drehmomentmaxima der beiden Felder werden gleichfalls um $^1/_4$ Wellenlänge verschoben sein. Diese Drehmomente werden sich nach zwei analogen Kurven ändern und das daraus folgende Drehmoment wird annähernd gleichbleibend sein.

Wenn sich der Anker schon in Drehung befindet, so kommen fortwährend andere Spulen in die neutralen Ebenen, d. h. in die Ebenen des maximalen Stromes bezw. des maximalen Drehmomentes. Die nicht in den neutralen Ebenen liegenden Spulen sind zugleich der Induktion und dem Drehmomente beider Felder ausgesetzt. Für diese ist daher der Apparat Umformer und Kraftmaschine zugleich.

Man sieht, dafs sich diese Kraftmaschine von denjenigen Teslas und Ferraris nicht nur durch die Anordnung der Feldmagnete gegen den Anker, sondern auch durch die Wirkungsweise wesentlich unterscheidet Es ist hier nicht die Resultante der zwei Kraftlinienbüschel, welche infolge der Phasenverschiebung in Drehung kommt und hierdurch den Anker mitnimmt, sondern es werden abwechselnd durch das eine Feld in einem Teile der Ankerbewickelung Ströme induziert, die, in dem anderen Teile verlaufend, von dem anderen Felde in mechanische Bewegung gebracht werden, und umgekehrt. Die Kraftmaschinen von Tesla und Ferrari gehen deshalb auch mit entsprechend geformten Eisenankern ohne Bewickelung, während die vorliegende Kraftmaschine ohne Bewickelung nicht geht.

Die beschriebene Maschine kann in mannigfacher Weise abgeändert werden und zwar entweder durch Änderung des Ankers allein, oder der Feldmagnete allein, oder beider zugleich.

Wird der Raum zwischen T' und T'' auch mit unterteiltem Eisen ausgefüllt, so entsteht eine Trommel. Zur Verringerung des magnetischen Widerstandes kann die Trommel an der Mantelfläche auch mit Nuten versehen sein, in welchen die Drähte untergebracht werden.

Anstatt einer Trommel kann es unter Umständen zweckmäfsiger sein, einen Ring mit in sich geschlossenen Bewickelungen (Spulen) zu verwenden.

Der Eisenkern der Trommel oder des Ringes wird in bekannter Weise unterteilt hergestellt und die Bewickelung in bekannter Weise darauf befestigt. Man kann diese Bewickelung

durch wirkliches Aufwickeln herstellen, man kann indessen auch den unterteilten Eisenkern mit einem vollkommenen Metallmantel versehen, der entsprechend geschlitzt ist, um die induzierten Ströme in die richtigen Bahnen zu leiten (Fig. 4 und 5 Tafel IX).

Die Kerne der Feldmagnete M' und M'' müssen ebenso wie die der Anker in bekannter Weise unterteilt sein. Die äufsere Form der Feldmagnete läfst aufserordentlich viele Abänderungen zu, beiläufig solche und so viele, als aus den Konstruktionen der Dynamo-Maschinen bekannt sind.

Die Anzahl der Pole kann eine beliebige gerade Zahl sein. Fig. 6 Tafel IX zeigt beispielsweise eine Kraftmaschine mit zwei vierpoligen Magneten M' und M'' (M'' ist der Deutlichkeit halber punktiert gezeichnet) und einen Trommelanker T; die Windungen auf der Trommel umfassen hier nicht 180°, sondern nur 90° des Umfanges.

Die in Fig. 1 und 6, Tafel IX, dargestellten Feldmagnete haben Polflächen, welche der Ankerfläche näher sind, als alle anderen Teile der Magnetkerne.

Im Gegensatze hierzu ist in Fig. 7 und 8 (Tafel IX) eine Form gezeichnet, bei der keine hervorragenden Polflächen vorhanden sind. Die Feldmagnete bilden zwei Ringe, welche nach Art der Gramme-Ringe so bewickelt sind, dafs die Pole an den Enden eines Durchmessers erscheinen. Eine solche Anordnung jedoch mit Nuten zur Aufnahme der Bewickelung auf Magneten und Anker zeigt Fig. 9 und 10 der Tafel IX.

Der Winkel, den die Polaritätsachsen der Feldmagnete M' und M'' miteinander bilden, kann je nach Umständen 90° betragen oder auch kleiner sein. Es wird in manchen Fällen auch zweckmäfsig sein, den einen Feldmagneten gegen den anderen verstellbar zu machen.

Anstatt die Polaritätsachsen der Feldmagnete einen Winkel miteinander bilden zu lassen, kann man dieselben auch in einer Ebene anordnen, dafür aber die eine Hälfte einer jeden Ankerspule um den entsprechenden Winkel verdrehen Fig. 11 und Fig. 12 der Tafel IX zeigt einen solchen Anker mit geschlitztem Kupfermantel und unterteiltem Eisenkerne.

Diese besondere Form läfst die Verschiedenheit zwischen der vorliegenden Konstruktion und der von Ferraris und Tesla besonders scharf hervortreten. Durch die beschriebene Verdrehung

der Bewickelung würde man nämlich bei den Kraftmaschinen von Ferraris und Tesla keine nützlichen Wirkungen erreichen können.

In den bisher beschriebenen Ankerkonstruktionen war jede Spule fortwährend in sich geschlossen. Will man alle Spulen oder nur einzelne geschlossen halten, so verwendet man für jede Spule einen Stromwender C mit Bürsten B, Fig. 13 Tafel IX, die miteinander unmittelbar oder durch Widerstände W in Verbindung stehen.

Die Kraftmaschine, die oben mit einer Trommel oder einem Ringanker beschrieben wurde, kann auch mit einem Scheibenanker hergestellt werden, d. h. mit einem solchen, welcher von den magnetischen Feldern achsial durchsetzt ist.

Fig. 14 und 15 der Tafel IX zeigen eine solche Anordnung. M' und M'' sind wieder die in ihren Intensitätsphasen gegeneinander verschobenen Magnetfelder und S ein Scheibenanker, der aus einzelnen gegeneinander versetzten Elementen E, Fig. 16 Tafel IX, besteht. Diese Elemente haben eine solche Form, dafs sie zugleich zwei Magnetfelder der einen Gattung, z. B. M' umfassen und zwei Magnetfelder der anderen Ordnung, in diesem Falle M'' schneiden. Diametrale Verbindungen können übrigens auch mehrere vorhanden sein, wie beispielsweise in Fig. 17 Tafel IX dargestellt. Fig. 18 Tafel IX zeigt die Form eines solchen Elementes E, wenn vier Paar Magnetfelder zur Verwendung gelangen.

In Oerlikon ist nach einem Bericht von Emil Kolben (E. T. Z. 1894 Heft 44) ein Vergleich angestellt worden zwischen einem 80 PS synchronen und einem 100 PS asynchronen Dreiphasen-Motor. Letzterer war in Örlikon gebaut, 18polig, 100 PS, 1730 Volt, verkettete Schaltung, bei 50 Perioden und 320 Umdrehungen in der Minute; er war für Hochspannung gebaut, hatte Sternschaltung, und die Wickelung bestand aus besonders geformten, mechanisch auf der Wickelbank hergestellten Spulen, welche in die mit Mikanitröhren isolierten Nuten des äufseren, feststehenden Teiles eingelegt und durch Isolierkeile in denselben festgehalten werden. Der Schlufsanker hat drei besondere Abteilungen mit 18 poliger Stabtrommelwickelung. Der synchrone Motor war nach der Type Kapp mit Flachringarmatur ebenfalls

in Örlikon gebaut, für 2200 Volt gewickelt und die Erreger-Maschine direkt mit der Hauptwelle gekuppelt. Die E. M.-K. entsprach fast genau der Sinuskurve.

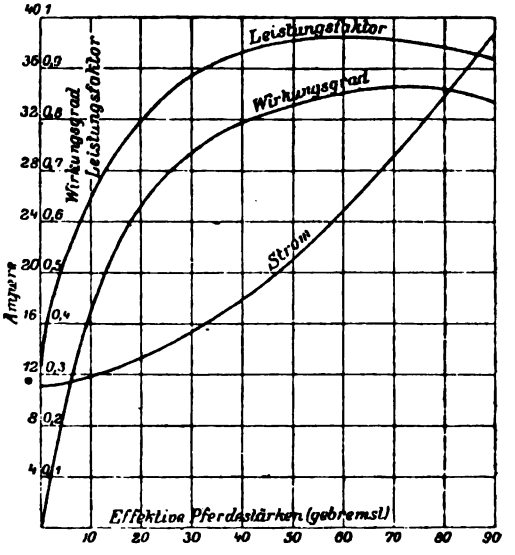


Fig. 199.

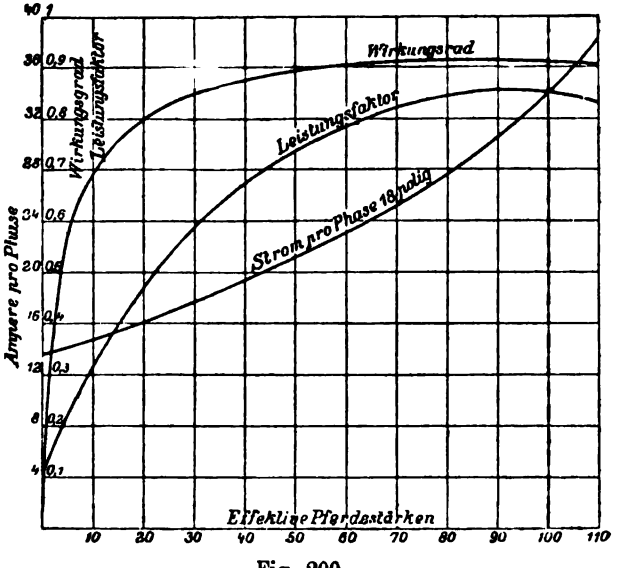


Fig. 200.

Die Fig. 199 (Seite 257) zeigt das Diagramm für den synchronen, die Fig. 200 (Seite 257) das Diagramm für den asynchronen Motor.

(Unter Leistungsfaktor versteht Herr Kolben das Verhältnis zwischen dem wirklichen, mit dem Wattmeter gemessenen, und dem scheinbaren, aus den Faktoren Stromstärke und Spannung berechneten Wattverbrauch.)

Aus der Vergleichung der beiden Diagramme ersehen wir, dafs der Leistungsfaktor des synchronen Motors für alle Belastungen günstiger ist als jener des asynchronen, wenn sie auch bei Vollbelastung, und das ist doch immer die Hauptsache, nicht bedeutend differieren.

Der „Wirkungsgrad" des asynchronen Drehstrom-Motors ist aber für alle Belastungen günstiger; er beträgt bei Vollbelastung 0,91, ein Wert, der bei einfachen Wechselstrom-Motoren wohl kaum erreicht werden dürfte.

Herr Emil Kolben hat in Oerlikon (E. T. Z. Heft 51 etc. 1894) über den Einfluſs der Kurvenform von Alternatoren auf den Betrieb von Motoren Untersuchungen angestellt und ist zu folgendem Resultat gekommen:

Ein richtig konstruierter ein- oder mehrphasiger Wechselstrom-Motor ist ganz unabhängig von der Bauart des Generators und dessen Kurvenform; der Stromverbrauch beim Anlassen, bei Leerlauf und bei voller Belastung der Motoren, so wie der Wattkonsum und der Leistungsfaktor zeigen für alle gebräuchlichen Generatoren nur geringe und in der Praxis zu vernachlässigende Differenzen. Kolben hat das — wie er sagt — an vielen Hunderten von Wechselstrom-Motoren beobachtet, er hebt aber das folgend beschriebene Experiment ganz besonders hervor:

Ein einphasiger asynchroner Oerlikon-Motor von 10 PS effektiver Leistung für 220 Volt Spannung, mit Schluſsanker, wurde unter genau gleichen Belastungsverhältnissen zuerst von einem Alternator des Kappschen Typus mit rotierender Flachringarmatur und Oberflächenwickelung betrieben und nachher von einem Oerlikon-Alternator, dessen Spulen in die Nuten des Ankereisens versenkt sind. Die Kurve der Kapp-Maschine verläuft fast genau sinoidal, jene der Oerlikon-Maschine ist in Fig. 201 dargestellt, und man sieht, sie ist gegenüber der idealen Sinuslinie

oben stark abgeflacht. Beide Kurven veränderten sich wesentlich, wenn die Belastung Selbstinduktion veranlafste.

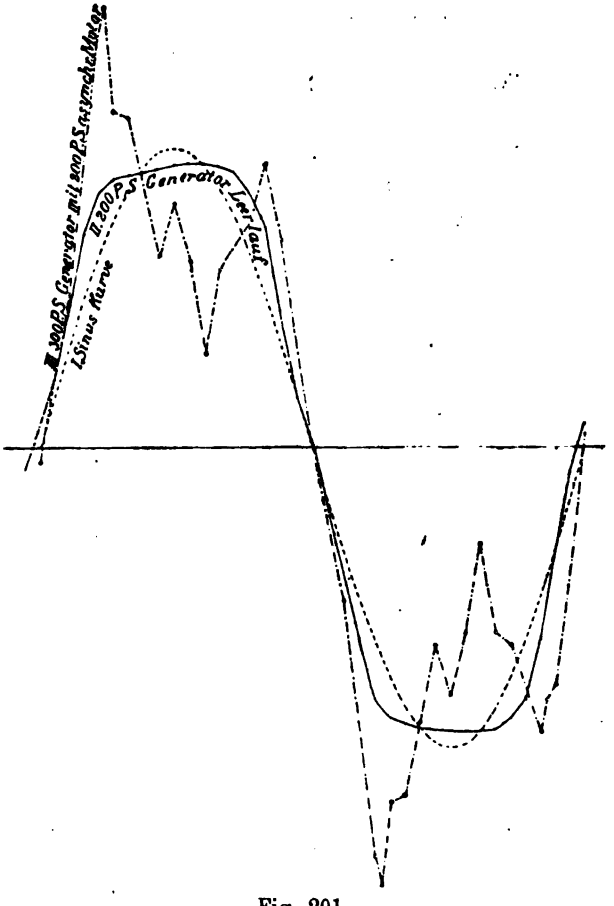


Fig. 201.

I. Betrieb mit Kapp-Alternator von 50 PS. 14polig, 430 U. p. M., 2000 Volt, Transformator von 20 Kilowatt.

Nutzleistung		U. p. M.	Spannung	Strom	Wattkonsum
PS	Watt		Volt	Ampère	Watt
ø	ø	1580	215	33	1100
2,5	1840	1575	215	33,5	2930
8,3	6100	1560	215	50	7600
11,0	8100	—	210	60	9800
12,2	9000	1520	210	70	11100
Anlauf mit Leerscheibe			200	45	—

II. Betrieb mit Oerlikon-Alternator von 100 PS. 12polig, 500 U. p. M., 2700 Volt, Transformator von 15 Kilowatt.

Nutzleistung		U. p. M.	Spannung	Strom	Wattkonsum
ø	ø	1520	215	33	1100
3,12	2300	—	212	34	3400
8,3	6100	1500	220	45	7400
9,8	7200	1494	220	48	8800
11,8	8700	1480	205	70	10800
Anlauf mit Leerscheibe			200	45	—

Aus diesen beiden Tabellen ist allerdings deutlich zu ersehen, dafs die Kurvenform keinen praktischen Einfluſs auf den Motorenbetrieb ausübt.

Wichtiger ist aber der Einfluſs der Motoren auf die Kurvenform der Generatoren.

Die Fig. 201 giebt davon ein recht eklatantes Beispiel: Die Leerlaufkurve verläuft ziemlich normal. Bei der Belastung mit einem 200 PS asynchronen Motor ergab sich die auffallende dritte Kurve, bei welcher die Spannung bis auf 13000 Volt stieg. Das gefährdet natürlich die Isolierung der Anlage, hat aber noch einen zweiten Übelstand:

Die Selbstinduktion der Fernleitung und mit ihr der Impedanzfaktor wird wesentlich erhöht und hierdurch der induktive Linienabfall vergröſsert (um circa das Doppelte des Ohmschen Abfalles); der Ladestrom der Leitung wird vergröſsert, und es ist infolgedessen eine Erhöhung des Leitungsverlustes zu beklagen. H. Kolben macht jedoch darauf aufmerksam, dafs je nach der Leitungskapazität ein erhöhter Ladestrom zur Ausbalancierung des induktiven Leitungsabfalles beitragen kann.

Anhang zur Abteilung IV.

Theorie der Drehstrom-Motoren.

Prof. Dr. G. Schilling war der erste, welcher eine ausführlichere Theorie über Drehstrom-Motoren versuchte und dieselbe am 5. Mai 1892 der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften in Wien überreichte[1]). Derselbe setzt nur voraus, dafs durch in der Phase verschobene Wechselströme ein gleichmäfsig rotierendes und nicht pulsierendes Magnetfeld erzeugt wird und dafs der bewegte Anker ähnlich wie der von Dobrowolsky aufgebaut und bewickelt sei. Er bemerkt, dafs in den Kupferstäben bei der Rotation im magnetischen Felde Induktionsströme erzeugt werden, und durch die ponderomotorische Wirkung des Feldes auf die von diesen Strömen durchflossenen Leiter und auf den durch diese Ströme magnetisierten Anker der letztere in Bewegung versetzt wird.

Um die Arbeit, welche der Anker bei dieser Drehung leisten kann, berechnen zu können, ist die Kenntnis der in den Ankerwindungen kreisenden Ströme erforderlich. Letztere entstehen durch das Schneiden der Kraftlinien; aber nicht allein jener, die das feste Feld bilden, sondern jener Resultierenden, die durch diese und jene Kraftlinien entsteht, welche im Anker entstehen und das Feld auf dem festen Teile des Motors sowohl bezüglich Richtung als auch Intensität beeinflussen. Dieses resultierende Feld dreht sich aber mit gleichbleibender Intensität konstant, sobald die Drehungsgeschwindigkeit des Ankers konstant geworden ist. Dabei wird es um einen Winkel ε vom ursprünglichen Felde abweichen.

Es sei nun:

R die mittlere magnetische Induktion, welche das resultierende Feld im Anker hervorbringt,

N die Umdrehungszahl des magnetischen Feldes in der Sekunde,

n „ „ „ „ Ankers in der Sekunde.

Selbstverständlich ist bei einem Motore $n < N$, weil sonst die induzierten Ströme die Bewegung des Ankers hemmen müfsten. Die Verhältnisse gestalten sich derart, als ob der Anker bei stillstehendem Felde in der Sekunde $N - n = \nu$ Umdrehungen in entgegengesetztem Sinne ausführen würde. Wir betrachten

[1]) Da die Schriften der Akademie der Wissenschaften doch nur selten zur Hand sein dürften, wird diese höchst interessante Abhandlung hier mit gütiger Bewilligung des Herrn Autors abgedruckt.

nun eine Windung, deren Normale zur Zeit t den Winkel α mit der Richtung der Kraftlinien des resultierenden Feldes bildet und meinen damit jene Richtung der Normalen, welche zur Zeit $t = \emptyset$ in die positive Richtung der Kraftlinien fällt; dann ist $\alpha + 2\nu\pi t$.

Die Intensität i des in dieser Windung zur Zeit t verlaufenden Stromes ist dann durch die Gleichung:

$$i w = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

gegeben, wenn w den Widerstand im Stromkreise und $\mathfrak{N}$ die Gesamtzahl der die Ebene der Windungen durchsetzenden Kraftlinien bedeutet.

In $\mathfrak{N}$ sind also auch die von dem Strome in dieser Windung herrührenden Kraftlinien enthalten, so dafs die Selbstinduktion dieser Windung nicht noch besonders zu berücksichtigen sein wird.

Das Vorzeichen ist so gewählt, dafs einer Abnahme der Kraftlinien eine direkt gerichtete oder positive elektromotorische Kraft entspricht, wobei jene Seite der Windungsebene, auf welcher die Kraftlinien eintreten, im Sinne des Zeigers einer Uhr vom Strome umflossen erscheint. Ist F die Windungsfläche (ein Achsenschnitt des zylindrischen Ankers), so ist:

$$\mathfrak{N} = F R \cos\alpha = F R \cos 2\nu\pi t$$

und die Gleichung für i wird nun:

$$w i = 2\nu\pi \cdot F R \sin 2\nu\pi t,$$

$$i = \frac{2\nu\pi \cdot F R}{w} \sin 2\nu\pi t = i_0 \sin\alpha,$$

wobei α den Winkel, welchen die Normale der Windung mit der Richtung des resultierenden Feldes bildet, und i_0 die Maximal-Stromstärke bedeutet.

Dieses letztere Feld schliefst mit dem von den festen Elektromotoren erzeugten Felde den Winkel ε ein. Um diesen berechnen zu können, ist die Kenntnis der beiden Komponenten nötig, welche das R zusammensetzen. Die eine ist die magnetische Induktion durch die Elektromagnete, die zweite die der Ankerwindungen. Die von einer Windung herrührende, mittlere, magnetisierende Kraft sei

$$a i = a i_0 \sin\alpha.$$

Diese Kraft wird in zwei Komponenten zerlegt, eine in der Richtung des resultierenden Feldes $a i_0 \sin\alpha \cos\alpha$, die andere senkrecht darauf $a i_0 \sin^2\alpha$. Sind im ganzen z Windungen gleichmäfsig über den Anker verteilt, so wird die Summe der von allen Windungen herrührenden Komponenten

$$\frac{z}{\pi}\int_0^{\pi} a i_0 \sin\alpha \cos\alpha \, d\alpha = \emptyset, \text{ resp. } \frac{z}{\pi}\int_0^{\pi} a i_0 \sin^2\alpha \, d\alpha = a i_0 \frac{z}{2}.$$

Die der letzteren Kraft entsprechende mittlere magnetische Induktion im Anker ist

$$B_1 = a i_0 \frac{z}{2} \mu,$$

wenn mit μ die magnetische Leitungsfähigkeit des Ankers bezeichnet wird. Man wird dieses μ als konstant betrachten können, und zwar noch für ziemlich grofse Kräfte, wenn nur der Achsenschnitt des Ankers genügend grofs ist.

Es sei ferner H die Intensität des Feldes der Elektromagnete; die entsprechende magnetische Induktion im Anker wird dann

$$B_2 = H \cdot \mu.$$

Diese zwei Gröfsen B_1 und B_2 sind, wie schon hervorgehoben wurde, die Komponenten von R.

Aus der Fig. 202 ergiebt sich

$$B_2^2 = B_1^2 + R^2.$$

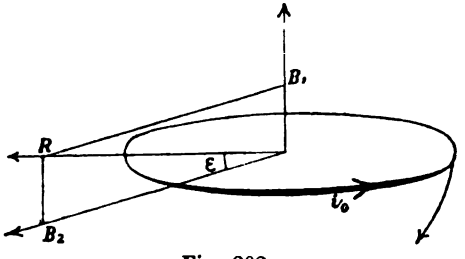


Fig. 202.

Diese Gleichung kann zur Bestimmung des R dienen; dabei mufs aber berücksichtigt werden, dafs auch B_1 das R enthält. Es war nämlich

$$B_1 = a\, i_0 \frac{s}{2} \mu = a \frac{s}{2} \mu \cdot \frac{2 \nu \pi F}{w} R = b\, R.$$

Nun wird $$B_2^2 = b^2 R^2 + R^2$$

und daraus folgt:

$$R = \frac{B_2}{\sqrt{1 + b^2}} = \frac{\mu H w}{\sqrt{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}},$$

$L = a \frac{s}{2} F \mu$ ist der Koeffizient der Selbstinduktion des Ankers.

Man erhält ferner:

$$i_0 = \frac{\mu H 2 \nu \pi F}{\sqrt{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}}, \qquad B_1 = \frac{\mu H 2 \nu \pi L}{\sqrt{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}};$$

mit Hilfe der Figur findet man auch:

$$\cos \varepsilon = \frac{R}{B_2} = \frac{w}{\sqrt{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}},$$

$$\sin \varepsilon = \frac{2 \nu \pi L}{\sqrt{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}}.$$

Das Drehungsmoment und die geleistete Arbeit.

Das Feld H übt auf die von den induzierten Strömen durchflossenen Ankerwindungen und auf den magnetisierten Eisenkern des Ankers Drehungs-

momente D_1, bezüglich D_2 aus. Um D_1 zu finden, kann man jeden Stromkreis durch eine magnetische Doppelplatte ersetzt denken. Das Moment einer solchen Platte, deren Normale mit der Richtung R den Winkel α bildet, ist $i F = i_0 F \sin\alpha$. Dieses Moment wird in zwei Komponenten zerlegt, die eine in der Richtung R, die andere senkrecht auf dieser; sie sind

$$i_0 F \sin\alpha \cos\alpha \quad \text{bezw.} \quad i_0 F \sin^2\alpha.$$

Die Summen aller derartigen Komponenten sind:

$$\frac{z}{\pi}\int_0^{\pi} i_0 F \sin\alpha \cos\alpha \, d\alpha = 0, \quad \text{und} \quad \frac{z}{\pi}\int_0^{\pi} i_0 F \sin^2\alpha \, d\alpha = i_0 F \cdot \frac{z}{2}.$$

Die Richtung des letzteren magnetischen Momentes bildet mit der Richtung H den Winkel $\frac{\pi}{2} + \varepsilon$; das Drehungsmoment ist somit

$$D_1 = H i_0 F \frac{z}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varepsilon\right)$$

$$= H i_0 F \frac{z}{2} \cos\varepsilon.$$

Der Anker ist so magnetisiert, dafs die ganze Induktion R beträgt. Dieser Gröfse ist sein magnetisches Moment proportional und es sei bezeichnet mit $c R$. Dann ist

$$D_2 = H c R \sin\varepsilon.$$

Das gesamte Drehungsmoment ist:

$$D = H i_0 F \frac{z}{2} \cos\varepsilon + H c R \sin\varepsilon.$$

Nach Einsetzen der entsprechenden Werte erhält man:

$$D = \mu H^2 w \frac{z}{2} \cdot \frac{2 \nu \pi F}{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2} [F + a c \mu] = G \frac{2 \nu \pi}{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}.$$

Zur Abkürzung wurde hierbei gesetzt:

$$G = \mu H^2 w \frac{z}{2} F [F + a c \mu].$$

Da nun angenommen wurde, dafs der Anker in der Sekunde n Umdrehungen macht, so ist die während dieser Zeit gewonnene Arbeit:

$$A = 2 n \pi \cdot D = G \cdot \frac{4 n \nu \pi^2}{w^2 + 4 \nu^2 \pi^2 L^2}.$$

Wärme in den Ankerwindungen.

In einer Windung wird während einer Umdrehung die Wärme

$$w \int_0^{\frac{1}{\nu}} i^2 \, dt = w i_0^2 \int_0^{\frac{1}{\nu}} \sin^2 2 \nu \pi t \, dt$$

$$= w i_0^2 \frac{1}{2 \nu}$$

entwickelt. In allen Windungen zusammen entsteht daher in jeder Sekunde die Wärmemenge

$$Q = w\, i_0^2 \frac{1}{2\nu} \cdot z \cdot \nu = w\, \mu^2 H^2 \frac{z}{2} F^2 \frac{4\nu^2\pi^2}{w^2 + 4\nu^2\pi^2 L^2},$$

$$Q = K \cdot \frac{4\nu^2\pi^2}{w^2 + 4\nu^2\pi^2 L^2}.$$

Zur Abkürzung wurde hierbei gesetzt

$$K = \mu^2 H^2 w \frac{z}{2} F^2.$$

In den soeben aufgestellten Ausdrücken für A und Q kommt neben den Konstanten des Motors auch noch die Größe $\nu = N - n$ vor. Während nun N nur von der Periode der angewendeten Wechselströme abhängt, somit als gegeben zu betrachten ist, wird n notwendig auch von der jeweiligen Belastung des Motors abhängen. Um jenes n wird es sich aber hauptsächlich handeln, für welches die vom Motor geleistete Arbeit A bei einer gegebenen Feldstärke H ein Maximum wird. Man findet dieses $n = n_1$ aus der Gleichung

$$\frac{dA}{dn} = 0.$$

Diese ergiebt[1])

$$n_1 = \frac{w^2 + 4N^2\pi^2L^2 - w\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2}}{4N\pi^2L^2} = N \frac{1}{1 + \frac{w}{\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2}}}$$

und nun wird

$$\nu_1 = N - n_1 = \frac{w\left[\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2} - w\right]}{4N\pi^2L^2} = N \frac{\frac{w}{\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2}}}{1 + \frac{w}{\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2}}}.$$

Diese ausgezeichneten Werthe von n und ν sind also von der Feldstärke unabhängig, wenigstens so lange als $L = a\,\mu\,F\frac{z}{2}$ als konstant gelten kann. Bei stärkerer Magnetisierung des Ankers wird μ, somit auch n_1 sinken, ν_1 dagegen steigen.

Die Arbeit, welche zu den hier berechneten Größen n_1 und ν_1 gehört, und die also das Maximum der bei einer bestimmten Feldstärke zu gewinnenden Arbeit darstellt, ist

$$A_1 = \frac{G}{2wL^2}\left[\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2} - w\right] = \frac{G \cdot 2N^2\pi^2}{w\left[\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2} + w\right]}.$$

Man findet endlich die hierbei in den Ankerwindungen auftretende Wärmemenge

---

[1]) Die Gleichung für n ist quadratisch und liefert zwei Auflösungen; die eine Wurzel kann gleich weggelassen werden, weil sie größer als N ist, bei einem Motor daher gar nicht in Betracht kommen kann.

$$Q_1 = A_1 \frac{N-n_1}{n_1} = \frac{K}{2L^2}\left[1 - \frac{w}{\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2}}\right] =$$

$$= K \frac{2N^2\pi^2}{\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2}\left[\sqrt{w^2 + 4N^2\pi^2L^2} + w\right]}.$$

Es ist interessant, an dieser Stelle die Spezialisierungen vorzunehmen, welche zu der ersten theoretischen Betrachtung der Drehstrom-Motoren durch Ferraris hinüberleiten.

Nimmt man an, dafs der Anker kein Eisen enthält und sieht man gleichzeitig von der Selbstinduktion der Ankerwindungen ab, so wird für das Maximum der Arbeit

$$n_0 = \frac{N}{2}, \quad A_0 = H^2 \frac{s}{2} F^2 \frac{N^2\pi^2}{w} = Q_0.$$

Der nutzbare Teil der im Motor erzeugten Energie, nämlich die Arbeit A_0, ist gleich dem als Wärme auftretenden Anteile, so dafs der Wirkungsgrad eines solchen Motors (selbst wenn man von der Wärme in den Windungen der feststehenden Elektromagnete absieht) nicht über 50% steigen könnte. Man konnte daher, so lange man sich dieser Formeln bediente, auf theoretischem Wege den Motoren keinen günstigen Wirkungsgrad vorhersagen. Dafs aber in der That bei den Motoren verschiedener Konstruktion ein besseres Verhältnis zwischen der nutzbaren und der verlorenen Energie bestehen kann, geht ohne weiteres aus unseren allgemeinen Gleichungen für A_1 und Q_1 hervor.

Man hat nämlich beim Maximum der Arbeit

$$\frac{A_1}{Q_1} = \frac{G}{K}\sqrt{1 + \frac{4N^2\pi^2L^2}{w^2}}$$

oder bei Berücksichtigung der früher erhaltenen Werte für L, G und K

$$\frac{A_1}{Q_1} = \frac{c\,a\,\mu + F}{\mu F}\sqrt{1 + \frac{N^2\pi^2a^2z^2\mu^2F^2}{w^2}}.$$

Nimmt man $a = 0$ und $\mu = 1$, $c = 0$, d. h., vernachlässigt man die Selbstinduktion und nimmt an, dafs der Anker kein Eisen enthalte, so folgt

$$\frac{A_0}{Q_0} = 1,$$

wie bereits gezeigt wurde.

Hält man nur die letztere Annahme aufrecht, zieht jedoch die Selbstinduktion in Rechnung, so wird

$$\frac{A'}{Q'} = \sqrt{1 + \frac{N^2\pi^2a^2z^2F^2}{w^2}},$$

also jedenfalls günstiger als bei Vernachlässigung der Selbstinduktion.

Ob nun auch der allgemeine Ausdruck $\frac{A_1}{Q_1}$ gröfser ist als 1, ist nicht ohne weiteres ersichtlich, da dieser Ausdruck die Gröfse μ, welche je nach den Dimensionen des Ankers verschiedene Werte annehmen kann — die aber alle bedeutend gröfser sind als 1 — im Zähler sowie im Nenner enthält. Die nachstehende Überlegung führt zum Ziele.

Ist die gesamte magnetisierende Kraft, die auf den Anker ausgeübt wird, P, so ist die magnetische Induktion $P\mu\,(=R)$, das magnetische Moment des Ankers $c\cdot P\mu$; ferner ist $a\,i_0\frac{z}{2}$ die magnetisierende Kraft, welche die Ankerwindungen erzeugen; $c\,P\mu\cdot a\,i_0\frac{z}{2}$ ist somit das Potential der Ströme in den Ankerwindungen auf den magnetisierten Anker.

Andererseits ist μP die induzierte Kraftströmung, welche durch den Querschnitt 1 des Eisens geht. Füllt das Eisen den Raum innerhalb der Windungen ganz aus, dann ist $F\mu P$ die Zahl der Kraftlinien, welche durch den gröfsten Querschnitt des Eisens, aber auch durch die Fläche jener Windung gehen, deren Normale in die Richtung der Kraftlinien fällt und die vom Strome i_0 durchflossen wird. Auf eine Fläche, deren Normale mit der Kraftströmung den Winkel α bildet, und die nach dem früheren vom Strome $i_0 \sin\alpha$ umkreist wird, treffen $F\mu P\cos\alpha$ Kraftlinien; das Potential des Magnetes auf diese Windung ist daher $i_0 \sin\alpha\, F\mu P\cos\alpha$, das Potential auf alle Ankerwindungen

$$\frac{z}{\pi} i_0 F\mu P \int_0^{\pi} \sin\alpha\cos\alpha\, d\alpha = \frac{z}{2} i_0 F\pi P.$$

Man sieht nunmehr, dafs $c\,a/F = 1$ ist, der Ausdruck für A_1/Q_1 wird demnach

$$\frac{A_1}{Q_1} = \left(1+\frac{1}{\mu}\right)\sqrt{1+\frac{N^2\pi^2 a^2 z^2 \mu^2 F^2}{w^2}}.$$

$\frac{1}{\mu}$ kann aber in den meisten Fällen gegen 1 vernachlässigt werden, so dafs der Ausdruck noch einfacher wird. Man sieht jedoch sofort, dafs jedenfalls $\frac{A_1}{Q_1} > \frac{A'}{Q'}$, weil im zweiten Gliede unter der Wurzel noch der Faktor μ auftritt. Zugleich ersieht man auch, dafs man trachten mufs, das μ grofs zu machen, wenn es sich darum handelt, ein günstiges Verhältnis der gewonnenen Arbeit zu der gleichzeitig auftretenden Wärme zu erhalten.

Bevor nun dazu übergegangen wird, den Wirkungsgrad eines Drehstrom-Motors zu bestimmen, möge noch eine kleine Betrachtung über das Drehungsmoment in einem solchen Motor Platz finden. Es war

$$D = G\cdot\frac{2(N-n)\pi}{w^2+4(N-n)^2\pi^2 L^2}.$$

Das Maximum des Drehungsmomentes tritt ein, wenn

$$\frac{dD}{dn} = \emptyset, \text{ d. i. für } n = n_2 = N - \frac{w}{2\pi L}.$$

Hier ist also $\nu_2 = N - n_2 = \frac{w}{2\pi L}$.

Das Maximum der Arbeit lag bei

$$N - n_1 = \frac{w}{2\pi L}\left[\sqrt{\frac{w^2+4N^2\pi^2L^2}{2N\pi L}} - w\right].$$

Da nun der Ausdruck in der Klammer kleiner ist als 1, wird

$$N - n_1 < N - n_2$$

$$n_2 < n_1.$$

Daraus geht aber hervor, dafs ein Motor, der schon das Maximum der Arbeit liefert, noch weiter belastet werden kann, ohne dafs derselbe sofort stehen bleibt. Denn dabei wird wohl die Tourenzahl sinken (und gleichzeitig die abgegebene Arbeit), das Drehungsmoment wird aber zunehmen, sofern nicht die Überbelastung so bedeutend ist, dafs n unter n_2 hinabgedrückt wird.

Der Wirkungsgrad.

Dem Gewinn an Arbeit A steht ein Energieaufwand l gegenüber, der entspricht: 1. der gewonnenen Arbeit A, 2. der Wärme Q in den Ankerwindungen, 3. der Wärme q in den Windungen des feststehenden Elektromagneten. Diese ganze Energie l mufs durch die von aufsen eingeleiteten Ströme geliefert werden. Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades kommt aber noch in Betracht, dafs von der Arbeit A nur ein Teil $\mathfrak{A}$ als nutzbar abgegeben werden kann, während der Rest a den Leerlauf des Ankers mit der jeweiligen Geschwindigkeit bestreitet.

$$\mathfrak{A} = A - a.$$

Der kommerzielle Wirkungsgrad ist demnach

$$g = \frac{\mathfrak{A}}{l} = \frac{A}{l} - \frac{a}{l}.$$

Der Motor werde nun mit p Wechselströmen gespeist, die um je $\frac{1}{p}$ der Periode gegeneinander verschoben sind. Der Strom in einer Leiterabteilung mit dem Widerstande W/p sei zu einer bestimmten Zeit

$$J = J_0 \sin 2 N \pi t.$$

Während einer Periode wird in dieser Leiterabteilung die Wärme

$$\frac{W}{p} \cdot J^2 = \frac{W}{p} J_0^2 \int_0^{\frac{1}{N}} \sin 2 N \pi t \, dt = \frac{W}{p} \cdot J_0^2 \cdot \frac{1}{2N}$$

entwickelt.

In allen Leiterabteilungen zusammen entsteht daher in jeder Sekunde die Wärmemenge

$$q = \frac{J_0^2 W}{2}.$$

Bei nicht zu grofser Stromstärke ist die von den Elektromagneten herrührende Feldstärke H dem J_0 proportional

$$H = k \cdot J_0,$$

somit

$$q = \frac{W}{2} \frac{H^2}{k^2}.$$

Ist der Motor bis zum Maximum der Arbeit belastet, dann kann man für A und Q die oben entwickelten Werte nehmen. Diese Werte enthalten aber

neben den Größen G bezw. K lauter Konstante. G und K selbst sind dem Quadrate der Feldstärke proportioniert. Daraus ergiebt sich aber, daſs aus dem ersten Gliede des Ausdruckes für g die Größe H^2 wegfällt, dieser erste Posten daher als konstant anzusehen ist; er heiſse γ. Der Zähler des zweiten Gliedes ist $a = 2 n_1 \pi d$, wenn n_1 die Tourenzahl des Ankers, d das Drehungsmoment für den Leerlauf ist. n_1 sowie d sind aber konstant für das jeweilige Maximum der Arbeit, daher auch a.

Der Ausdruck für den kommerziellen Wirkungsgrad ist nunmehr

$$g = \gamma - \frac{a}{l},$$

die Kurve, welche die Abhängigkeit des g von der verbrauchten Energie wiedergiebt, ist eine gleichseitige Hyperbel. Nimmt man die l als Abscissen, die g als Ordinaten, so schneidet die Kurve die Abscissenachse im Punkte $l_0 = \frac{a}{g}$, steigt allmählich an, und zwar immer langsamer und nähert sich endlich assymptotisch einer Geraden, welche in der Entfernung γ von der Abscissenachse parallel mit dieser gezogen wird.

Für gröſsere Werte der konsumierten Energie l wird aber der Verlauf der Kurve noch etwas abgeändert. Es ergiebt sich dies aus dem Bau des Ausdruckes für γ. Wenn man nämlich diesen Ausdruck im Zähler und Nenner durch H^2 dividiert, wie dies früher schon gethan wurde, dann nimmt er die Form an

$$\gamma = \frac{1}{c + \frac{d}{k^2}},$$

wo c und d Konstante sind. Für gröſsere Werte von J_0 bezw. H wird k abnehmen und demgemäſs auch γ. Dies hat aber zur Folge, daſs unsere Kurve $g = f(l)$ sich im weiteren Verlaufe wieder gegen die Abscissenachse senken müſste. Im wesentlichen stimmt also diese Kurve mit derjenigen überein, welche H. v. Dobrowolsky auf Grund seiner Beobachtungen im 13. Hefte der Berliner elektrotechnischen Zeitschrift gegeben hat.

Prof. E. Arnold in Karlsruhe hat seiner Zeit (1894) im Verlage der Polytechnischen Buchhandlung A. Seydel, Berlin, eine Broschüre über „Die Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrom-Motoren“ veröffentlicht und giebt in der E. T. Z. 1895, Heft 41 Seite 662, einen prägnanten Auszug aus derselben. Er verweist darauf, daſs er schon im Anfange des Jahres 1894 die Mitteilung veröffentlichte, daſs ein asynchroner Einphasen-Motor hinsichtlich der gelieferten Arbeit äquivalent ist mit dem Systeme zweier Drehfeld-Motoren, die jeder von dem Strome $\frac{J}{2}$ gespeist werden und auf ein und dieselbe Welle gesetzt sind, wobei die beiden Drehfelder in entgegengesetzter Richtung rotieren.

Er hat dort bewiesen, daſs das resultierende Drehmoment des Motors durch zwei Drehfelder, jedes entsprechend einer Stromstärke $\frac{J_1}{2}$ erzeugt werden

kann, von denen relativ zu den Windungen des Ankers das eine mit der Winkelgeschwindigkeit $p_1 - p_2$ in der Richtung der Rotation des Ankers und das andere mit der Geschwindigkeit $p_1 + p_2$ entgegengesetzt zu dieser Richtung rotiert.

In seiner Theorie der Wechselstrom-Motoren ist, entsprechend den beiden fiktiven Drehfeldern, ein positives Drehmoment D_p und ein negatives Drehmoment D_n unterschieden.

Für den Energieverbrauch des Motors und den Energieverlust infolge des Jouleschen Effektes im sekundären Stromkreise kommt die Summe der Wirkung der beiden Drehmomente, und für die Leistung des Motors die Differenz der beiden Drehmomente in Betracht.

Der totale vom Motor verbrauchte Effekt in Watt wird

$$W_1 = R_1 J_1^2 + p_1 (D_p + D_n)$$

der Joulesche Effekt im sekundären Stromkreise

$$W_2 = (p_1 + p_2) D_n + (p_1 - p_2) D_p$$

die Wattleistung des Motors

$$W = p_2 (D_p - D_n)$$

und der Wirkungsgrad des Motors

$$\eta = \frac{W}{W_1} = \frac{W}{R_1 J_1^2 + W + W_2} = \frac{p_2 (D_p - D_n)}{R_1 J_1^2 + p_1 (D_p + D_n)}.$$

Setzt man in den obigen Gleichungen das negative Drehmoment $D_n = 0$, so gelten dieselben für Mehrphasen-Motoren. Der Wirkungsgrad der Mehrphasen-Motoren muſs daher unter gleichen Bedingungen gröſser sein als derjenige der Einphasen-Motoren.

Ist der Verlust im primären Kupfer $R_1 J_1^2$ klein, so wird annähernd

$$\eta = \frac{p_2}{p_1},$$

d. h. gleich dem Verhältnisse der Winkelgeschwindigkeit des Ankers zu derjenigen des Drehfeldes.

Bei eingeschalteter Primärwickelung und ruhendem Anker ist $p_2 = 0$, die beiden fiktiven Drehfelder bewegen sich daher mit gleicher Winkelgeschwindigkeit p_1 in entgegengesetzter Richtung; es wird daher $D_p = D_n$ und der Motor kann kein Drehmoment äuſsern. Der Joulesche Effekt (W_2) im Anker wird für beide Drehfelder ebenfalls gleich.

Für den Arbeitsgang des Motors ist dagegen p_2 nahezu $= p_1$ und das negative Drehmoment beträgt nur einige Prozente des Drehmomentes bei voller Leistung. Für die Berechnung der Leistung und der Hauptdimensionen des Motors darf daher das negative Drehmoment vernachlässigt werden. Man gelangt dann zu den einfachen Formeln, welche in der erwähnten Arbeit zu finden sind und welche Prof. Arnold seit einigen Jahren für die Berechnung von Wechselstrom-Motoren benutze.

Bezeichnet L_1 den Selbstinduktionskoeffizienten der primären und L_2 den Selbstinduktionskoeffizienten einer Phase der sekundären Wickelung und M den Maximalwert des Koeffizienten der gegenseitigen Induktion, so ist bekanntlich keine Streuung vorhanden, wenn

$$M^2 = L_1 L_2.$$

Prof. Arnold setzte in seiner Theorie der Wechselstrom-Motoren

$$M^2 = \sigma^2 \cdot L_1 L_2,$$

worin $\sigma < 1$ als Streuungskoeffizient bezeichnet wurde.

Da die primäre und sekundäre Streuung einander nicht gleich sind, müßte richtiger

$$M^2 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot L_1 \cdot L_2$$

gesetzt werden.

Diese Koeffizienten geben an, welcher Teil des primären magnetischen Flusses in den sekundären Kreis bezw. welcher Teil des sekundären Flusses in den primären Kreis eintritt, wenn die Erregung durch die primäre bezw. die sekundäre Wickelung allein erfolgen würde. — Zu den Hopkinsonschen Koeffizienten v_1 v_2 stehen dieselben in der Beziehung

$$\sigma_1 \sigma_2 = \frac{1}{v_1 v_2}.$$

Während die Koeffizienten v_1 und v_2 größer als 1 sind, sind σ_1 und σ_2 kleiner als 1. Prof. Arnold meint schließlich, es sei richtiger, die Streuung durch einen Koeffizienten, der kleiner als 1 ist, auszudrücken.

V. Abteilung.

Regelung der Zugkraft und Geschwindigkeit bei Drehstrom-Motoren.

Einleitung. — Regelung nach Dr. A. Krebs, nach M. M. Rotten. — Ausgleicher von Siemens & Halske. — Ankerschaltungen der Fabrik Oerlikon. — Anlafsvorrichtungen der A. E.-G. — Verringerung der Umdrehungszahlen nach Siemens & Halske.

Beim Anlassen der Drehstrom-Elektromotoren bedarf man erfahrungsgemäfs bedeutend geringerer Spannungen als beim Leerlauf. Der Grund hiervon liegt darin, dafs im Kurzschlufsanker mit den in sich geschlossenen Strombahnen, so lange derselbe noch nicht eine nahezu synchrone Drehung mit jener der Kraftlinien des Drehfeldes erreicht hat, schon bei geringer Feldstärke so mächtige Ströme erregt werden, dafs die nötige Zugkraft ausgeübt wird. Zur Erzeugung der geringen Feldstärke ist aber ein kleiner Spannungsunterschied an den Klemmen der erregenden Windungen der Maschine ausreichend. Erst nachdem der Anker eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat, braucht man nach und nach ein stärkeres Feld.

Würde man von Anfang an die Maschine mit der vollen Spannung anlassen, so würde sie zu schnell in Gang kommen und einen starken Stromstofs im Leitungsnetz verursachen. Das Anlassen mittels vorgeschalteter Widerstände würde dem zwar abhelfen, dadurch würde aber nutzloser Energieverbrauch veranlafst, auch müfsten dieselben sehr grofs gebaut werden, um der Erwärmung stand halten zu können. Zwei Umstände sind zu berücksichtigen, wenn man die Leistungen der Drehstrom-Motoren zu regulieren beabsichtigt:

1. dafs die Intensität des Feldes abhängt von der Anzahl der Windungen (eine konstante Gröfse) und von der Erregerstromstärke, deren Regulierung durch Veränderungen der Spannung innerhalb gewisser Grenzen möglich ist;

2. dafs die Feldstärke und die dadurch hervorgerufene Zugkraft auch abhängig ist von der Stärke der im Anker erregten Foucault-Ströme bezw. in den Windungen des Ankers erregten Induktionsströme. Diese werden wieder bestimmt durch die Gröfse der induzierten elektromotorischen Kraft, dividiert durch den festen Leitungswiderstand. Die eben erwähnte elektromotorische Kraft erreicht ihren höchsten Wert, wenn der Anker feststeht, und den Wert Null, wenn seine Umdrehungszahl der Umlaufszahl des äufseren Feldes gleich ist, was übrigens nie eintreten kann, da infolge der stets vorhandenen Reibung der Anker immer etwas zurückbleibt. In den Zwischenwerten ist die in den Ankerwindungen erregte elektromotorische Kraft abhängig von dem Unterschiede beider Umlaufszahlen. Je gröfser dieser Unterschied ist, desto gröfser ist die Zugkraft.

Man hat demnach in der Veränderung der Umlaufsgeschwindigkeiten des äufseren Feldes ein vielfach verwendetes Mittel zur Regelung der Induktionsströme des Ankers.

Sind beim Angehen die erregten Windungen des Ankers kurz geschlossen, so hat die elektromotorische Kraft in denselben den höchsten Wert, es wird daher der so erzeugte starke Induktionsstrom das Feld derart beeinträchtigen, dafs das Angehen des Motors in Frage gestellt sein kann. Nachdem sich aber kurz geschlossene Spulen am Anker bei voller Geschwindigkeit als vortrefflich erwiesen haben, hat man die Grenzen der Regulierbarkeit bestimmt, und v. Dobrowolsky hat schon im Jahre 1890 proponiert, in die Ankerleitungen regulierbare Widerstände einzuschalten, wozu Metalle, Flüssigkeiten, Glühlampen verwendet werden können, und er glaubte damit jede beliebige Geschwindigkeit und Zugkraft herstellen zu können.

Dr. A. Krebs in Berlin giebt (D. R.-Patent Nr. 54967 21. Jan. 1890) ein Verfahren an, um Zugkraft und Geschwindigkeit von Wechselstrom-Kraftmaschinen zu regeln, und er meint, das einfachste Mittel zur Regelung der Geschwindigkeit des Ankers sei die Veränderung der Zahl der wirksamen Pole. Diese kann durch eine veränderliche Schaltung der Erregerspulen erreicht

werden. Die Fig. 203 zeigt uns einen Tesla-Motor. A ist der Anker, R das Feld, welches durch 12 Spulen erregt wird. Die Enden der Spulen gehen an 24 Stromschlufsstücke 1 bis 24. Die Stromzuführung erfolgt durch die vier Schienen $P N P' N'$. Schiebt man die 24 Stromschlufsstücke z. B. auf die Schaltreihe I, so erhält man im Ringe R zwei rotierende Pole; schiebt man sie auf die Schaltreihe II, so erhält man vier Pole. Bei zwei Polen macht der Anker $^1/_2$, bei vier Polen $^1/_4$ Umdrehungen im Verlaufe

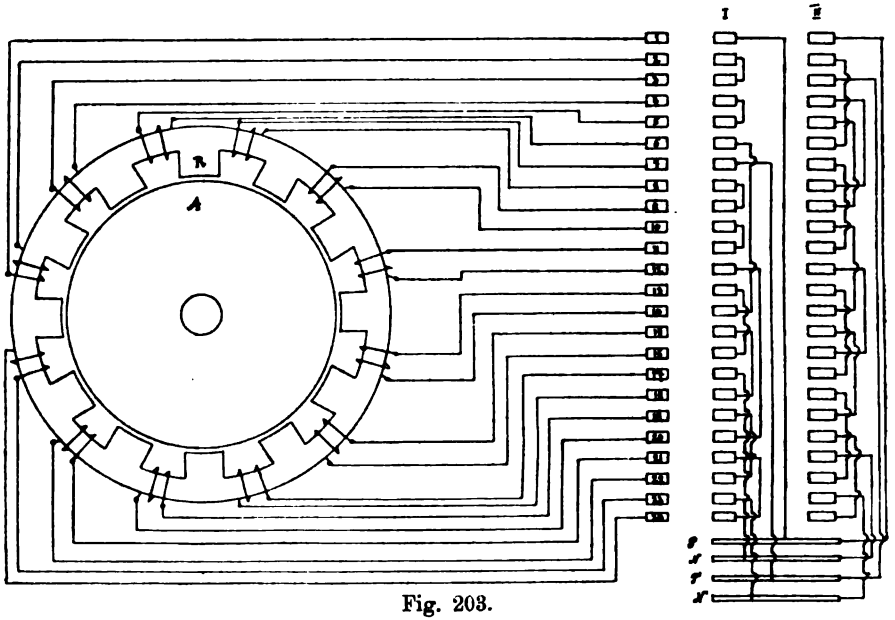


Fig. 203.

eines Polwechsels. Er hat also bei zwei Polen seine kleinste Zugkraft, da er seine gröfste Geschwindigkeit besitzt und das Produkt aus Zugkraft und Geschwindigkeit höchstens gleich der gröfsten Zahl PS sein kann. Bei vier Polen, wo er nur die Hälfte der Umdrehung zu machen braucht, wird seine Zugkraft doppelt so grofs sein. In derselben Weise kann man durch eine weitere Schaltreihe in Verbindung mit einer geeigneten Anzahl Erregerspulen durch eine einfache Umschaltung der Kraftmaschine 6, 8, 10 .... n Pole geben, so dafs seine synchrone Geschwindigkeit sich zu der mit zwei Polen verhält, wie

$$\frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{n} \text{ zu } \frac{1}{2}.$$

Es ist gar nicht nötig, den Ring *R* mit so vielen gleichen Windungsabteilungen zu versehen, dafs durch eine Verbindung gleicher Spulen die gewünschte Anzahl von Polen herauskommt. Man kann vielmehr den Ring *R* mit einer fortlaufenden gleichnamigen Wickelung versehen, welche für jede Schaltreihe in die geeignete Anzahl von Teilen zerlegt wird, und zwar derart, dafs eine Einteilung ganz unabhängig von den anderen durchgeführt wird.

Sollen mehrere Drehstrom-Treibmaschinen in einer Reihe hintereinander, oder soll eine solche Maschine bei veränderlicher Leistung aber mit gleichbleibender Stromstärke betrieben werden, so entsteht die Aufgabe, die Klemmenspannung der Maschine von Null bis zu einem gröfsten Wert zu ändern. Das beim Betrieb mit gleichbleibender Spannung gebräuchliche Mittel der Vorschaltung von Widerständen ist in diesem Falle nicht anwendbar, weil die Klemmenspannung der Maschine selbst dadurch gar nicht beeinflufst werden würde. Es erwies sich also als wünschenswert, eine Einrichtung zu treffen, welche eine Regelung der Treibmaschine in den oben angegebenen Fällen dadurch vorzunehmen ermöglicht, dafs man die wirksame Windungszahl und, da die Stromstärke als gegeben angenommen ist, somit auch die wirksame Ampèrewindungszahl der Treibmaschine verändert.

M. M. Rotten in Berlin hat eine solche Regelungseinrichtung für Drehstrom-Treibmaschinen konstruiert (D. R.-Patent Nr. 68411 dto. 12. Nov. 1891) und soll dieselbe im Nachstehenden beschrieben werden.

An einer Drehstrom-Treibmaschine von beliebiger Ausführungsform werden die Spulen, welche das Drehfeld erzeugen, in eine gewöhnlich bei allen gleich grofse Anzahl von einander gleichwertigen Unterabteilungen geteilt. Diese Unterabteilungen der Induktionsspulen bleiben hintereinander geschaltet, aber die Stellen, an denen je zwei derselben zusammenstofsen, sind derart in einer Reihe von festen Stromschlufsstücken verbunden, dafs durch Verschieben von Gleitstücken, die mit den Stromzuleitungen der betreffenden Hauptspulen verbunden sind, auf den oben erwähnten festen Stromschlufsstücken eine beliebige Anzahl von Unterabteilungen ausgeschaltet und damit die wirksame Ampèrewindungszahl von einem höchsten Wert bis auf Null vermindert werden kann.

In den Fig. 204 und 205 ist die Einrichtung für eine Dreispulen-Treibmaschine dargestellt. Die Stromschlufstücke A_1 bis A_{48}, welche mit den Vereinigungspunkten je zweier Unterabteilungen in leitender Verbindung stehen, sind beispielsweise, wie die letzteren, kreisförmig angeordnet. Die Stromzuführung zu den drei Spulen erfolgt durch die drei Gleitstücke C_1 C_2 C_3. Dieselben sind voneinander isoliert, an dem drehbaren Ringe B_1 B_2 B_3 befestigt und stehen mit den drei Hauptleitungen in Kontakt. Die drei verschiedenphasigen Wechselströme durchfliefsen die zwischen

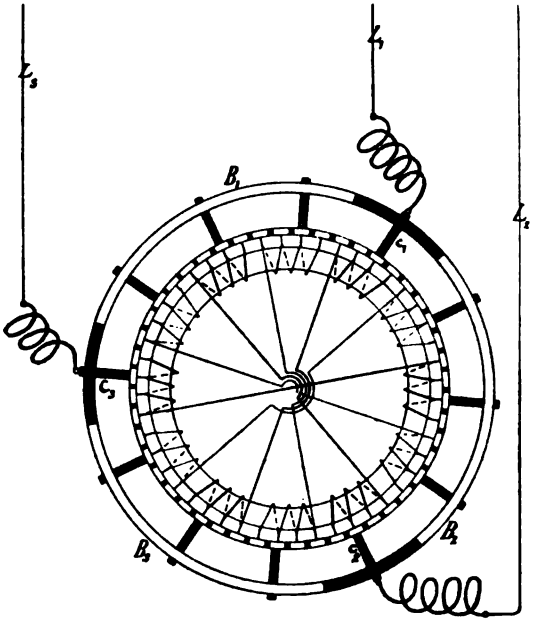


Fig. 204.

C_1 und A_1 bezw. C_2 und A_{17} und C_3 und A_{33} gelegenen Unterabteilungen der drei Hauptspulen. Stehen die verstellbaren Stromschlufsstücke C_1, C_2 und C_3 auf A_{16}, A_{32} und A_{48}, so sind sämtliche Unterabteilungen eingeschaltet, und die Treibmaschine läuft mit ihrer gröfsten Zugkraft; stehen die verstellbaren Stromschlufsstücke aber auf A_1, A_{17} und A_{33}, so sind sämtliche Unterabteilungen ausgeschaltet, d. h. die Treibmaschine ist kurz geschlossen d. h. auch ausgeschaltet.

Siemens & Halske konstruierten einen Ausgleicher für

Drehstromanordnungen (D. R.-Patent Nr. 75049 13. Juni 1891) nach folgenden Erörterungen:

Sollen mittels Drehstrom an einer oder mehreren Verbrauchsstellen eine Anzahl von Stromaufnehmern gespeist werden, welche so beschaffen sind, dafs sie nicht gleichzeitig an alle drei Leitungen angeschlossen werden können, so besteht die Notwendigkeit, entweder die Anzahl der unter sich gleich gedachten Stromaufnehmer, welche in drei oder mehr Zweigen eingeschaltet sind, stets gleich zu halten, oder aber es mufs eine Einrichtung vorgesehen werden,

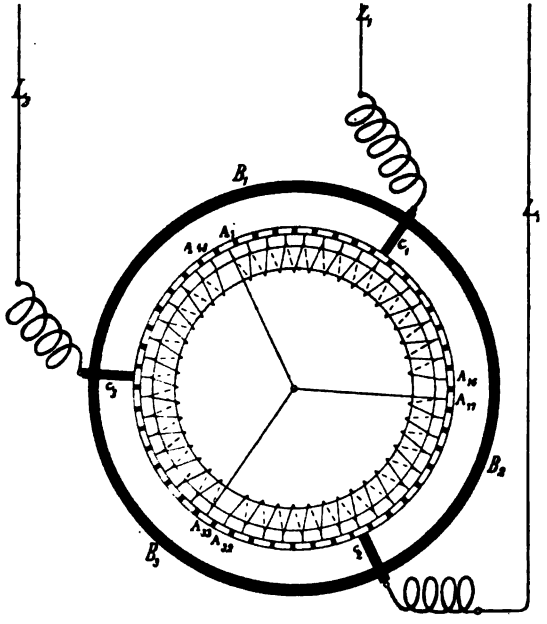


Fig. 205.

welche bewirkt, dafs unabhängig von der Belastung die Spannungen in allen Zweigen sich selbst gleich bleiben. Anderenfalls würden die Stromaufnehmer bei wechselndem Verbrauch nicht unerheblichen Spannungsschwankungen ausgesetzt sein.

Man hat bei Mehrleitersystemen verschiedener Art, seien sie mit Wechselstrom oder mit Gleichstrom betrieben, Vorrichtungen angewendet, welche einen Ausgleich der Spannungen dadurch herbeiführen, dafs elektromotorische Gegenkräfte auf die eine oder die andere Weise von der Belastung des betreffenden Zweiges, in

welchem sie eingeschaltet sind, abhängig gemacht werden und so eine für den betriebsmäfsigen Bedarf genügenden Ausgleich der Spannungen herbeiführen. Solche bekannten Einrichtungen lassen sich aber nur unter besonderen Umständen in unveränderter Form auf Drehstrom-Systeme anwenden; es wäre dies etwa der Fall, wenn eine Schaltung für Stromaufnehmer, wie die in Fig. 206 schematisch dargestellte, zur Anwendung käme. In Fig. 206 sind sämtliche Stromaufnehmer zwischen die drei je einen einfachen Wechselstrom führenden Drehstromleitungen eingeschaltet, es liegt also zwischen den Punkten a und b, den Punkten b und c und den Punkten c und d je eine oder eine beliebige Anzahl von Lampen. Bei einem derartig gestalteten Verteilungssystem ist es

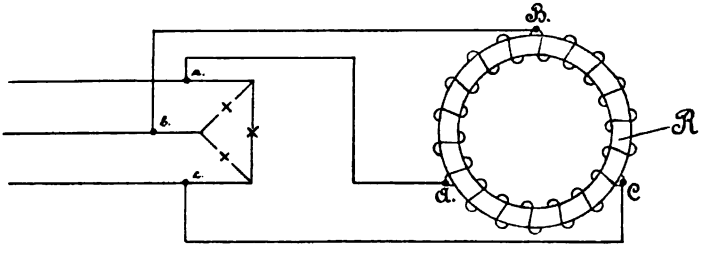


Fig. 206.

genügend, an den Hauptverbrauchsstellen einen Drehstromwandler beliebiger bekannter Ausführungsform in derselben Weise zwischen die Leitungen zu schalten. Der Umwandler ist in Fig. 206 der Einfachheit halber in Form eines Grammeschen Ringes R mit fortlaufender Bewickelung dargestellt, und drei in gleichen Abständen von einander angeordnete Punkte $A\,B\,C$ sind durch Zweigleitungen einfach an die Punkte $a\,b\,c$ angeschlossen. Wird alsdann an einen der Zweige des Systems eine gröfsere Anzahl von Lampen eingeschaltet, als zur Zeit in den beiden anderen Zweigen brennen, so wird ein Ausgleich der Spannungen in den drei Zweigen dadurch herbeigeführt, dafs die beiden in den weniger belasteten Zweigen gelegenen Spulen des Ringes R wie die primären, die in den mehr belasteten Zweigen gelegene Spule des Ringes R wie die sekundären Windungen eines gewöhnlichen Stromwandlers wirken, somit die Spannung in der letztgenannten Spule erhöht, die Spannung in den beiden erstgenannten Spulen vermindert wird. Die in Fig. 206 dargestellte Schaltung der

Stromaufnehmer ist indessen ungünstig, weil der Strom, welcher durch irgend eine der Leitungen den Stromaufnehmern zugeführt wird, sich an der Verbrauchsstelle stets in zwei Ströme teilen, mithin jederzeit gröfser sein mufs als der thatsächlich nutzbare Strom.

In der That zeigt die bekannte theoretische Betrachtung, dafs bei dieser Schaltung der Strom in den zuführenden Leitungen um den Faktor $\sqrt{3}$ gröfser sein mufs als der nutzbare Strom in den Lampen. Diese Schaltung bedingt daher einen verhältnismäfsig grofsen Aufwand an Kupfer in den Leitungen.

Die Konstruktion von Siemens & Halske bezieht sich auf eine Schaltungsweise, welche gestattet, unter bester Ausnutzung des Leitungskupfers einen völlig genügenden Ausgleich der Gebrauchsspannung durch Verwendung eines Stromwandlers herbeizuführen.

Fig. 207 giebt eine schematische Darstellung dieser Schaltungsweise. Die Stromaufnehmer sind mit je einer Klemme an die

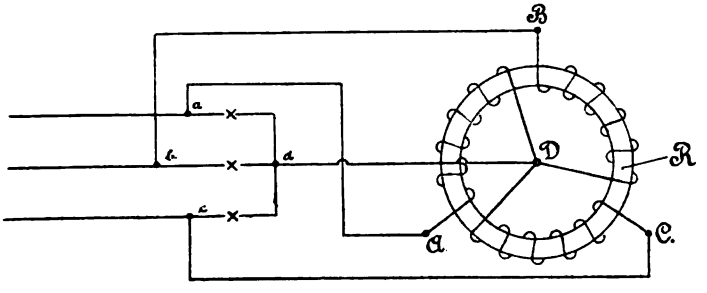


Fig. 207.

Punkte *abc* angeschlossen, und sämtliche freie Klemmen sind einfach untereinander kurz verbunden. Bei dieser Art der Schaltung führt die Leitung nicht mehr Strom als die Stromaufnehmer; indessen genügt es bei dieser Art der Schaltung nicht mehr, zum Zweck des Spannungsausgleiches bei wechselndem Verbrauch einen Stromwandler, wie in Fig. 206 einfach zwischen die Leitungen zu schalten, vielmehr mufs hier die den Gegenstand der vorstehenden Beschreibung bildende besondere Schaltung des Stromwandlers zur Anwendung kommen. Diese besteht darin, dafs die Wickelung des als Grammescher Ring dargestellten Umwandlers in drei gleiche Teile zerlegt ist, an denen je ein Ende

A B C mit den Leitungspunkten *a b c* verbunden ist, während die freien Enden wiederum untereinander im Punkte *D* vereinigt werden. Der Punkt *D* endlich wird durch eine vierte Leitung mit dem Punkte *d* des Verteilungssystems verbunden. Auf diese Weise wird erfahrungsgemäfs ein vollkommen genügender Spannungsausgleich herbeigeführt.

Die beiden Fig. 208 und 209 dienen dazu, die gekennzeichnete Schaltung in ihrer Ausführung an praktisch verwendbaren Stromwandlern darzustellen. Solche Stromwandler können auch in

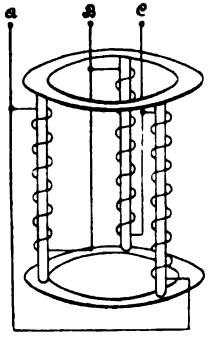


Fig. 208.

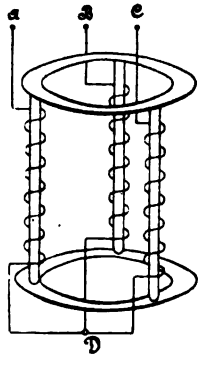


Fig. 209.

beliebiger anderer Ausführungsform verwendet werden, ohne dafs das Wesen dieser Konstruktion dadurch geändert würde. Siemens & Halske betrachten es auch als selbstverständlich, dafs ein mehr als dreiteiliges Drehstrom-System verwendet werden könnte, ohne dafs der Rahmen der Erfindung verlassen würde.

Die nachfolgend beschriebene Schaltungsart an Ankern mehrphasiger Kraftmaschinen stammt von der Maschinenfabrik „Oerlikon“ und besteht darin, dafs unabhängig von der Zahl der Phasen des äufseren Drehfeldes der Ankerwickelung, die entweder nach der Art des Grammeringes, der Trommel oder als Polanker hergestellt ist, in zwei oder mehr Abteilungen (Spulen) geteilt wird. Die Enden der einzelnen Abteilungen sind teils untereinander verbunden, teils führen dieselben zu Schleifringen. Wird die Zahl der freien Enden grofs, so hält man, um die vielen Schleifringe zu vermeiden, den Anker fest und läfst die Spulen des Drehfeldes kreisen. Die Gruppierung der Ankerspulen ist stets eine derartige, dafs ein Angehen mit regulierbarer Zugkraft dadurch

erhalten werden kann, dafs die Spulen entweder einzeln oder der Reihe nach eingeschaltet oder erst in Reihe bezw. gegeneinander und dann parallel geschaltet oder in anderer Weise gruppiert werden. Im Augenblicke des Angehens, d. h. bei grofser Differenz der Umlaufszahlen zwischen Drehfeld und Anker, ist die Induktion im Anker am gröfsten, wir erhalten daher auch bei Reihenschaltung der Spulen eine grofse Stromstärke. Nähert sich der Anker dem synchronen Gang und nimmt die Induktion im Anker ab, so schaltet man die Spulen parallel, um die Zugkraft der Maschine nicht zu schwächen bezw. um eine von der Belastung möglichst unabhängige Umdrehungszahl zu erhalten. Durch diese Schaltungen wird die Selbstinduktion des Ankers geändert, und es wird möglich, ohne Zuhilfenahme eines Widerstandes oder durch Zuhilfenahme von nur wenig Widerstand eine grofse Zugkraft ohne übermäfsiges Anwachsen des Stromes zu erhalten.

In den Fig. 210 bis 222 sind einige solcher Schaltungsanordnungen als Beispiele dargestellt:

In Fig. 210 soll D den Eisenkörper des Drehfeldes von beliebiger Phasen- und Polzahl und J den Induktor oder Anker bedeuten. S sind die erregenden Spulen, welchen Wechselströme mit entsprechend verschiedenen Phasen zugeführt werden. Der Anker trägt nur eine einzige Spule, welche in zwei Teile A und B getrennt ist. Die Enden der Abteilung A sind an die Schleifringe $R' R''$ und die Enden der Abteilung B an $R''' R''''$ angeschlossen; vier Schleifbürsten verbinden diese Ringe mit entsprechenden Klemmen des Umschalters. Beträgt die Windungszahl der ersten Abteilung a und diejenige der zweiten Abteilung b — wobei a gröfser als b —, so wird beim Anlassen der Kraftmaschine so geschaltet, dafs die wirksamen Windungen zuerst gleich $a + b$, dann der Reihe nach gleich $a\,b$ sind; schliefslich wird parallel geschaltet. Will man auf einige dieser Schaltungen verzichten, so wird die Zahl der Schleifringe kleiner. In den Fig. 211 bis 217 sind einige Ankerwickelungen für mehrere Spulen, in denen Ströme verschiedener Phase induziert werden, aufgezeichnet.

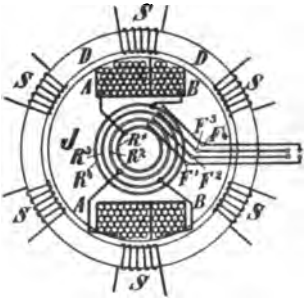


Fig. 210.

In Fig. 211 wird zunächst die Spule A durch einen veränderlichen Widerstand geschlossen und dann Spule B parallel hinzugeschaltet.

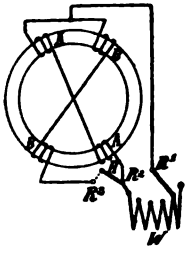


Fig. 211.

In Fig. 212 sind bei Annahme eines Trommelankers die Spulen A und B in Reihe und nach Einschalten des Hebels H parallel verbunden.

Fig. 213 veranschaulicht den Fall der Parallelschaltung der Spulen A und B. Nach Einschaltung des Hebels H wird die Mittelphase durch die zwischenliegende Spule C geführt.

In Fig. 214 befinden sich anfangs sämtliche Spulen mit dem Widerstande oder ohne Widerstand W in Reihe; durch das Schliefsen der Hebel H' und H'' wird die Parallelschaltung herbeigeführt.

Die Fig. 215, 216 und 217 zeigen die Eigentümlichkeit, dafs zunächst nur eine Spule, und zwar die Spule A, durch den Widerstand oder ohne Widerstand kurz geschlossen wird; nach

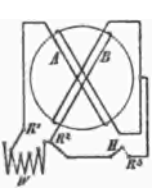


Fig. 212.

Fig. 213.

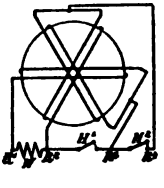


Fig. 214.

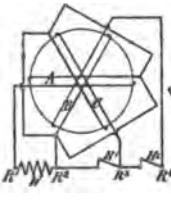


Fig. 215.

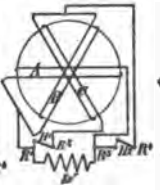


Fig. 216.

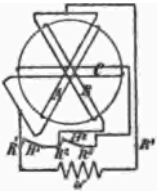


Fig. 217.

dem Angehen der Maschine werden mittels der Hebel H' und H' die übrigen Spulen eingeschaltet.

Zur näheren Erläuterung des Vorgangs beim Gegenstand vorstehend beschriebener Schaltungsweise sei z. B. die dem Anker einer zweipoligen Drehstrom-Kraftmaschine entsprechende Fig. 218 herausgegriffen. Denke man sich den Anker festgehalten und

das Feld, welches durch schraffierte Pole angedeutet ist, allein kreisend, wie das beim Anlaufen der Maschine auch zutrifft.

Zunächst seien nur die Klemmen R' und R'' verbunden. In der Stellung I erfährt die Spule A die maximale Induktion, die Induktion in den Spulen B und C hebt sich auf, in der Stellung II werden A und B gleichmäfsig induziert, und C ist induktionsfrei. Die Ströme in A und B wirken einander entgegen, d. h. die Spulen sind stromlos.

In der Stellung III befindet sich B im Maximum der Induktion etc. Wir erhalten somit einen einfachen Wechselstrom. Verbinden wir nun die Klemmen R'' und R''', so wird die Spule A kurz geschlossen und die Spulen B und C bleiben in Reihe verbunden; nunmehr erhalten wir zwei Wechselströme verschiedener Phase; schliefsen wir noch R''' an R'''', so sind alle drei Spulen

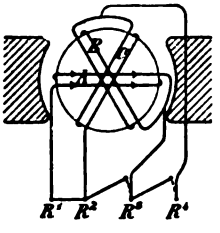


Fig. 218.

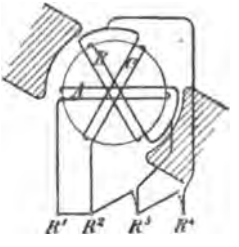


Fig. 219.

Fig. 220.

Fig. 221.

Fig. 222.

kurz geschlossen, und jetzt werden durch das Drehfeld drei Wechselströme verschiedener Phase in diesen Spulen induziert. Jede Spule kann für sich wieder in einzelne Abteilungen zerlegt werden, wie dies in Fig. 210 für eine Spule angedeutet ist. Diese Abteilungen können neben- oder hintereinander verbunden werden. Die vielen Schleifringe, welche eine derartige Anordnung bei

kreisendem Anker zur Folge hätten, können durch Festhalten des Ankers und Kreisen der Feldspulen vermieden werden.

Der eigentliche Zweck der verschiedenen Gruppierung und Schaltung der Spulen ist daher eine Änderung der Selbstinduktion der Ankerwickelung. Eine Drehstrom-Kraftmaschine mit einem Anker ohne Selbstinduktion wird niemals von selbst angehen, je gröfser die Selbstinduktion, d. h. je gröfser die Windungszahl und je kleiner der Widerstand der Wickelung, um so gröfser ist die Selbstinduktion und um so gröfser die Zugkraft.

Im Augenblicke des Angehens, d. h. bei grofser Differenz der Umlaufszahlen zwischen Drehfeld und Anker, ist die Induktion im Anker am gröfsten; wir erhalten daher auch bei Reihenschaltung der Spulen eine grofse Stromstärke. Nähert sich der Anker dem synchronen Gange und nimmt die Induktion im Anker ab, so schaltet man die Spulen parallel, um die Zugkraft der Maschine nicht zu schwächen bezw. um eine von der Belastung möglichst unabhängige Umdrehungszahl zu erhalten. Die Zugkraft der Maschine kann daher durch die beschriebenen Schaltungen geregelt werden. Ein allmähliches Angehen der Kraftmaschine macht eine Verminderung der Windungszahl, ein Angehen mit grofser Zugkraft eine Erhöhung der Windungszahl erforderlich.

Die A. E.-G. hat 1892 eine Anlafsvorrichtung für Drehstrom-Treibmaschinen konstruiert, welche ein langsames Anlassen durch allmähliche Steigerung der Spannung bezweckt, ohne dafs dabei elektrische Energie verschwendet wird.

In Fig. 223 ist die bezügliche Anordnung schematisch dargestellt. Drei Spulen s_1 s_2 s_3 sind je auf einen geteilten Eisenkern gewickelt; diese drei Kerne sind nach Art der Drehstromumwandler unter sich durch zwei Joche magnetisch verbunden. Die Spulen sind an je einem ihrer Enden an die Leitungen L_1 L_2 L_3 angeschlossen, während die anderen Drahtenden gemeinsam durch das Leitungsstück N verbunden sind. Dieses Stück N bildet den neutralen (Knoten-) Punkt des Drehstromes. Von der Drehstrom-Treibmaschine D führen Leitungen l_1 l_2 l_3 zu den gemeinsam bewegten Stromschlufsstücken (etwa Schleiffedern) c_1 c_2 c_3. Befinden sich diese letzteren ganz dicht bei N (unten), so ist keine Spannung zwischen l_1 l_2 l_3 möglich. Je weiter man die Schleifstücke von der neutralen Schiene entfernt, um so höher steigt die der Maschine zugeführte Spannung, bis man an die

oberen Enden der Spulen gelangt, wo dann die volle Leitungsspannung herrscht. In Wirklichkeit wird man meistens die Schleiffedern c_1 c_2 c_3 nicht unmittelbar auf den Windungen der Spulen s schleifen lassen, sondern sich eines Schaltbrettes (Fig. 224) mit einer dreiteiligen Kurbel und besonderer Stromschlufsplättchen bedienen, wobei letztere mit Unterabteilungen oder Windungsgruppen der Spulen in Verbindung stehen. In Fig. 224 sind diese Verbindungsleitungen für die mittlere Spule s_2 der Deutlichkeit halber fortgelassen. Steht die dreifache Kurbel auf den Plättchen 1, 1, 1, so erhält die Treibmaschine keine Spannung, da ihre Leitungen nur an die neutrale Stelle des Drehstrom-

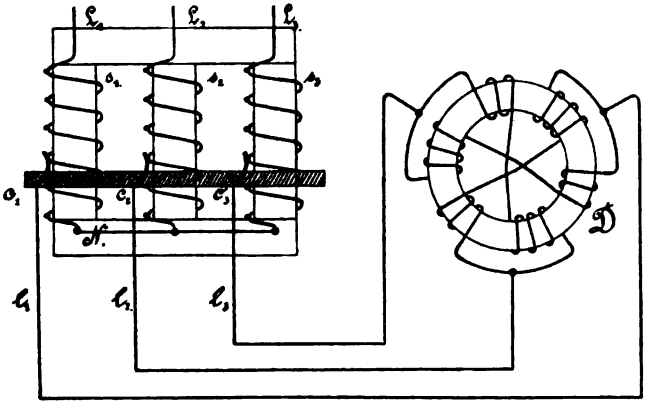


Fig. 223.

netzes angeschlossen sind, dreht man aber die Kurbel nach und nach auf die Plättchen 2, 3, 4 etc., so fängt die Maschine allmählich zu laufen an.

Da die Windungen der Spulen s_1 s_2 s_3 mit äufserst geringen Widerständen gebaut werden können, so tritt auch keine bedeutende Erhitzung derselben ein.

Bei der Ausführung der beschriebenen Vorrichtung ist darauf zu achten, dafs beim Übergange der Schleiffeder von einem Plättchen zum anderen der Strom nicht unterbrochen wird. Es mufs deswegen das Schleifstück breiter sein, als der Abstand der Stromschlufsplättchen von einander. Dies bringt nun aber den Nachteil, dafs bei vorübergehender gleichzeitiger Berührung der zwei benachbarten Plättchen durch das Schleifstück die betreffende

Spulenabteilung kurzgeschlossen wird und in derselben seitens der anderen Spulen ein starker Strom erregt wird.

Um dies zu vermeiden, kann man sich mehrerer Mittel bedienen. Eines derselben besteht darin, dafs man die Zuleitungsdrähte, welche in Fig. 224 punktiert sind, aus schlechtleitender Masse (Eisen oder Neusilber) macht, so dafs dieselben einem zu

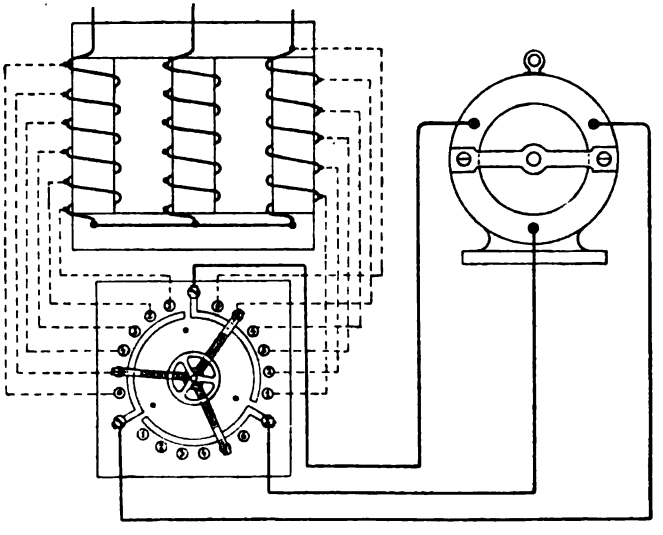


Fig. 224.

starken Anwachsen des Stromes in der kurzgeschlossenen Abteilung einen gewissen Widerstand bieten.

Da die elektromotorische Kraft nur einer Spulenabteilung sehr klein ist, so genügt auch ein verhältnismäfsig kleiner Betrag von Widerstand.

Fig. 225 zeigt eine ähnliche, etwas abgeänderte Anordnung. Ein anderes Mittel ist eine Abänderung desjenigen, welches bei den Zellenschaltern bei Sammelbatterien benutzt wird. Man macht die Abstände der Stromschlufsplättchen 1, 2, 3, 4 etwas gröfser und benutzt ein aus zwei von einander getrennten Teilen bestehendes Schleifstück (Fig. 226). Zwischen diesen Teilen schaltet man nun eine Spule J mit bestimmter Selbstinduktion ein, z. B. einige Windungen, welche um einen Eisenring gewickelt sind, oder einen gewöhnlichen Widerstand. Befindet sich die Kurbel z. B. in solcher Stellung, dafs sich eine Schleiffeder

auf dem Plättchen 3 und die andere auf dem Plättchen 4 befindet, so kann in der betreffenden Spulenabteilung vermöge der Selbstinduktion bezw. des vorgeschalteten Widerstandes in J kein zu grofser Strom entstehen.

Siemens & Halske haben 1893 (D. R.-Pat. 73050) eine ähnliche Einrichtung und zwar zur Verringerung der Umdrehungszahlen in Drehstrom-Elektromotoren getroffen und soll dieselbe hier nach den Angaben jener Firma beschrieben werden:

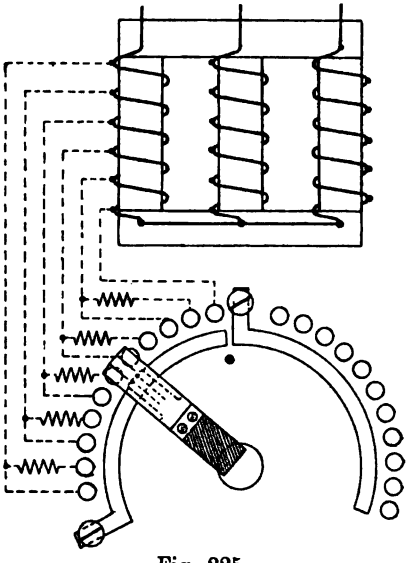


Fig. 225.

Die Fig. 227 (Seite 288) zeigt das bezügliche Schema und ist der für die Praxis wichtige Fall angenommen, dafs zwei Drehstrom-Motoren zu gleicher Leistung miteinander verbunden sind:

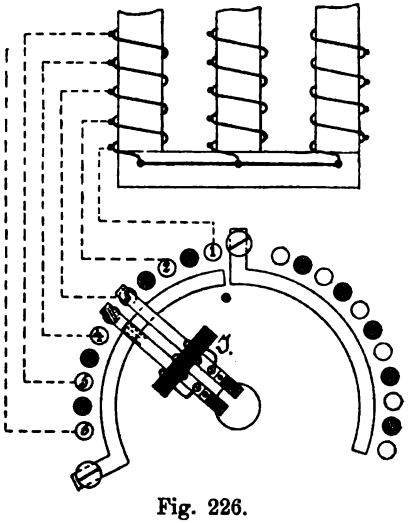


Fig. 226.

Die Schaltung der primären Wickelung der einen Maschine mit den Klemmen $P'\,P''\,P'''$ bleibt unverändert. Durch die Klemmen $P'\,P''\,P'''$ wird dieser Wickelung von aufsen Drehstrom zugeführt. Die induzierte Wickelung dieser Maschine mit den Klemmen $A'\,A''\,A'''$ sind durch die primäre Wickelung der zweiten Maschine mit den Klemmen $B'\,B''\,B'''$ geschlossen. Die induzierte Wickelung der zweiten Treibmaschine mit den Klemmen $Q'\,Q''\,Q'''$ wird durch einen Anlafswiderstand AW geschlossen, der nach dem Anlaufen ausgeschaltet werden kann. Ob die primären Wickelungen oder

die induzierten Wickelungen der Elektromotoren umlaufen, ist dabei ganz gleichgiltig.

Denkt man sich zunächst beide Treibmaschinen ruhend, so wird, sobald in die primäre Wickelung der erste Drehstrom eingeführt wird, in ihrer geschlossenen Wickelung Drehstrom von derselben Periodenzahl, wie sie der primäre Drehstrom besitzt, erzeugt. Dieser Drehstrom speist die zweite Treibmaschine und erzeugt in derselben ein Drehfeld, dessen Geschwindigkeit im Anfange die des Synchronismus ist. Beide Maschinen setzen sich dann in Bewegung. Dadurch nimmt die Periodenzahl des

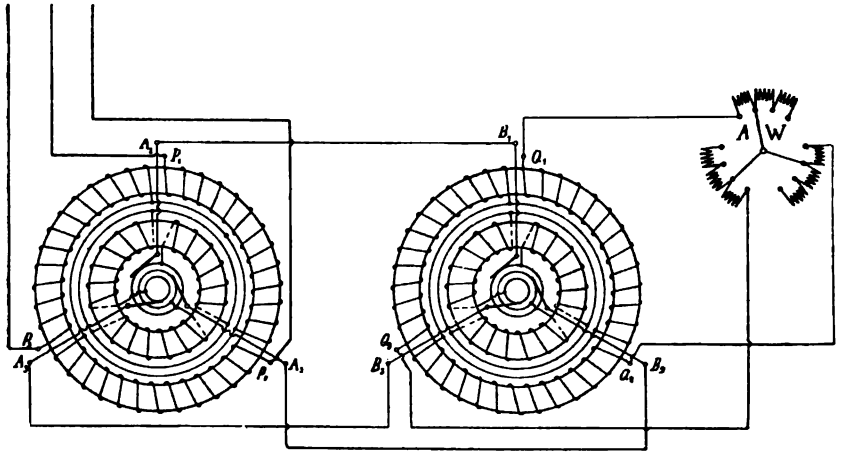


Fig. 227.

in der ersten Maschine erzeugten Drehstromes ab. Infolgedessen sucht sich die zweite Maschine auf eine geringere Umdrehungszahl einzustellen, als dem Synchronismus entspricht. Die Summe der Umdrehungszahlen beider Maschinen ist dann, abgesehen von den geringen Verlusten, die durch die Belastung bewirkt werden, gleich der dem Synchronismus entsprechenden Umdrehungszahl. Die Geschwindigkeiten der beiden Elektromotoren verhalten sich zu einander umgekehrt wie ihre Belastungen. Wenn also z. B. beide gleich belastet sind, stellen sie sich auf ungefähr gleiche Umdrehungzahlen ein; oder umgekehrt, wenn beide mechanisch so miteinander verbunden sind, dafs sie gleiche Umdrehungszahlen einhalten müssen, so leisten sie, indem sie sich beide auf die halbe Umdrehungszahl des Synchronismus einstellen, beide

gleich viel Arbeit. Thatsächlich werden die beiden Maschinen aber nicht völlig die halbe Geschwindigkeit des Synchronismus erreichen, sondern, wie alle belasteten Drehstrom-Motoren, um einige Prozente hinter der theoretischen Geschwindigkeit zurückbleiben.

Die erste Maschine arbeitet mit normaler Spannung und normaler Magnetisierung. Die Windungszahl ihres induzierten Teiles ist so zu wählen, dafs auch die primäre Wickelung der zweiten Maschine die für die normale Magnetisierung erforderliche Spannung zugeführt erhält. Die beschriebene Schaltung möge nach ähnlichen Schaltungen bei Leydener Flaschen mit dem Namen Kaskadenschaltung bezeichnet werden. Die Zugkraft und der Wirkungsgrad der Treibmaschinen sind annähernd dieselben, gleichgiltig, ob sie in Kaskadenschaltung für die halbe oder in Parallelschaltung für die volle Umdrehungszahl miteinander verbunden sind. Die Kaskadenschaltung kann auch dazu benutzt werden, Treibmaschinen herzustellen, die mit veränderlicher Geschwindigkeit und doch stets gutem Nutzeffekte arbeiten, indem man die umlaufenden Teile beider Maschinen auf dieselbe Welle setzt. Sie werden dann, wenn sie mit halber Geschwindigkeit laufen sollen, in der beschriebenen Weise zusammengeschaltet. Vorteilhaft ist es, den induzierten Teil der ersten und den induzierenden der zweiten Maschine auf die Achse zu setzen, weil man dann gar keine Schleifringe gebraucht. Die Wickelung kann dann eine völlige Kurzschlufswickelung sein, d. h. eine Wickelung, bei der immer diejenigen Drähte oder Stäbe der Wickelung, die in jedem Augenblicke gleichen Induktionswirkungen ausgesetzt sind, in beiden Ankern zu einem in sich geschlossenen Stromkreise hintereinander geschaltet sind. Die Anordnung wird allerdings dadurch etwas verwickelt, dafs sich die Leitungen von dem einen umlaufenden Teile zu dem anderen kreuzen müssen, da sonst die Drehungsmomente beider Maschinen einander entgegengesetzt gerichtet sein würden.

Bei dem beschriebenen Verfahren wird keine Energie vergeudet, da die bei dem Zurückbleiben des umlaufenden Teiles der ersten Maschine durch Induktion auf diesen übertragene Energie zum Betriebe der zweiten verwendet wird. Der in die Kurzschlufswickelung der zweiten eingeschaltete Widerstand ist selbstverständlich bei vollem Betriebe ausgeschaltet, so dafs auch hier

keine Energie verloren geht. Das ganze System arbeitet also mit sehr hohem Wirkungsgrade, und da in den primären Wickelungen beider Maschinen normale Spannung, und in den in sich geschlossenen Wickelungen normale Stromstärke vorhanden ist, wird auch die Zugkraft der Treibmaschinen, die ja nur von dieser Spannung und dieser Stromstärke, nicht aber von der Geschwindigkeit abhängig ist, vollständig normal.

Wenn man nach der beschriebenen Kaskadenschaltung drei miteinander mechanisch gekuppelte Treibmaschinen miteinander verbindet, so kann man dadurch ohne Herabsetzung des Wirkungsgrades die Umdrehungszahl auf ein Drittel der normalen herabsetzen. Wenn die zweite Treibmaschine mit der ersten nicht mechanisch gekuppelt ist, so kann man durch ihre Belastung allein die Umlaufszahl der ersten verringern. Beide kann man entfernt von einander aufstellen; wenn man also die zweite Maschine in dem Systeme bremst und einen veränderlichen Widerstand in ihren Anker einschaltet, kann man aus beliebiger Entfernung die Umlaufsgeschwindigkeit der ersten Treibmaschine regeln.

VI. Abteilung.

Transformatoren.

Einleitung. — Litteraturnachweis. — Primäre Gesamtarbeit. — Transformatoren von Tesla, von Schuckert, der A. E.-G. — Kurven des Wirkungsgrades, des Wattverbrauches und des Wattverlustes.

Es war nicht zu umgehen, auch schon in den Erörterungen der fünf ersten Abteilungen hier und da Hinweise und Beschreibungen über die Anwendung von Transformatoren beim Drehstromsysteme einzuschalten (siehe besonders Seite 113, 131, 152, 153, 155, 173, 215) und es konnte dies um so unbedenklicher geschehen, als die Prinzipien der Drehstrom-Transformation fast vollkommen jenen gleichen, die wir beim einfachen Wechselstrombetriebe kennen gelernt haben.

Über dieses Thema sind auch im Laufe des Jahres 1895, also in jüngster Zeit, zwei vortreffliche Werke erschienen:

(Ingenieur Clarence P. Feldmann. Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstrom-Transformatoren. Für die Praxis bearbeitet. Verlag O. Leiner. gr. 8°. 480 Seiten mit 306 Abbildungen. Brosch. Mk. 12.—. Inhalt: Das magnetische Feld und die Grundgesetze der Induktion. Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreise. Wirkungsweise und Wirkungsgrad der Wechselstrom-Transformatoren. Messinstrumente und Messmethoden der Wechselstromtechnik. Über die Prüfung des Eisens. Methoden zur Untersuchung von Transformatoren. Über die wahre Gestalt der periodischen Kurven der EMK und des Stromes. Berechnung der Transformatoren; und Gisbert Kapp. Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom. Eine

Darstellung ihrer Theorie, Konstruktion und Anwendung. Mit 133 Abbildungen. Verlag J. Springer und R. Oldenbourg. Gebunden Mk. 7.—.)

Wir können uns daher an dieser Stelle auf wenige Bemerkungen beschränken.

Bekanntlich verwendet man, um Wechselströme von einer bestimmten Spannung in solche anderer Spannung zu verwandeln, Induktionsapparate, welche im wesentlichen aus zwei Spulen oder Spulengruppen, einer sogenannten primären und einer sekundären bestehen, wobei diese beiden Spulen einen gemeinschaftlichen Kern oder eine gemeinschaftliche Umhüllung aus Eisen erhalten, damit die Stärke des magnetischen Feldes und so der Nutzeffekt des Apparates erhöht werde. Dabei wird durch Entstehen und Verschwinden des Magnetismus oder durch schnelles Umkehren desselben der Strom in der sekundären Rolle erregt. Aufser dieser Art der Induktion kann man letztere auch durch Verschiebung des induzierenden Magnetismus in dem Kerne hervorrufen. Bei dieser Art der Induktion verschwindet und entsteht also nicht abwechselnd der Magnetismus im Eisenkörper, sondern es kreist ein bestimmter gleichbleibender Betrag von Magnetismus in demselben, wodurch abwechselnd verschiedene Teile der sekundären Spulen der Induktion unterliegen.

Diese Verschiebung geschah bisher in einem einzigen magnetischen Kreise mittels zweier wechselnder Pole, die um eine Viertelphase verschoben waren.

Wir werden später sehen, wie man diese Anordnung weiter entwickelt hat.

Bedeutet i_1 den primären, i_2 den sekundären Strom, r_1 und r_2 die zugehörigen Widerstände, Q die Gröfsen des Verlustes durch Hysteresis; bedeutet ferner η den Transformationskoeffizienten, d. i. das Verhältnis der elektromotorischen Kräfte bezw. der Klemmenspannungen e_1 e_2, welches Verhältnis den Windungszahlen proportional gesetzt werden kann, so ist, rein theoretisch betrachtet, der Mittelwert der aufgewendeten primären Arbeit:

$$M(EJ) = M(e_2\, i_2) + M(i_1^2\, r_1) + M(i_2^2\, r_2) + Q$$

$$e_2 = e_1\, \eta \quad \text{und} \quad i_2 = \frac{i_1}{\eta}.$$

Der Energieverlust schwankt bei den gebräuchlichen Trans-

formatoren zwischen 2,5 und 5% bei voller Belastung; er wächst aber bei nicht vollständiger Ausnutzung.

Transformation des Drehstromes kann erreicht werden, indem man in jeden Zweig des Drehstromes, den ein einzelner Wechselstrom durchfliefst, einen der bekannten Transformatoren mit einer primären und einer sekundären Leitung einschaltet.

Beim dreiphasigen Drehstrome würde man daher, abgesehen von den Nebenleitungen, mindestens drei Stück Transformatoren brauchen. Es ist aber leicht einzusehen, dafs es einfacher ist und viel weniger Kosten verursacht, wenn man Transformationsapparate baut, in denen der gesamte Komplex aller drei Ströme in einer einzigen Vorrichtung transformirt werden kann (siehe Fig. 1, Tafel V und Fig. 1, Tafel VI). Schon Tesla hat seine zur Erzeugung des zweiphasigen Drehstromes verwendeten Wechselströme transformiert (D. R.-Patent 47012). Da er aber zumeist unabhängige Stromkreise verwendete, hat er auch in seinen Transformatoren die primären und die sekundären Spulen in unabhängigen Gruppen angeordnet.

Auch „Schuckert" hat eine ähnliche Einrichtung gewählt (E. T. Z. 1891 Seite 385). Diese Firma verwendet unter anderen einen Flachring mit — sagen wir — vier Nuten. Die primären Wickelungen werden in die Nuten 1 und 4 und 2 und 3, die sekundären dagegen in Nuten 1 und 2 und 3 und 4 eingelegt.

Sind die primären Wechselströme i_1 in den Nuten 1 und 4 und i_2 in den Nuten 2 und 3 in der Phase um 90° verschoben, so ist die sekundäre Spule in den Nuten 1 und 2 in der Nute 1 der Einwirkung von i_1, in der Nute 2 der Einwirkung von i_2 ausgesetzt; der induzierte sekundäre Strom ist gegen i_1 und i_2 in der Phase verschoben. In den sekundären Spulen der Nuten 3 und 4 spielt sich ein analoger Vorgang ab. Die beiden sekundären Ströme sind gegeneinander in der Phase um 90°, gegen die primären Ströme i_1 und i_2 um je 45° verschoben. „Schuckert" haben diese Transformatoren schon auf der Frankfurter Ausstellung 1891 gezeigt. Die neueren Vorrichtungen zur Transformation, welche dieselbe Firma (laut des D. R.-P. 79018) nunmehr in Drehstromanlagen benutzt, hat ebenfalls noch getrennte, magnetische Stromkreise und gestatten aus einer gegebenen Zahl von Wechselströmen neue, in der Phase verschobene Ströme nach

Belieben zu bilden. Bei diesen Transformatoren sind die Wickelungen der unabhängigen magnetischen Kreise so angeordnet, dafs die primären Mehrphasenströme immer nur auf je einen magnetischen Stromkreis wirken, während die sekundären Bewickelungen immer von mehreren der magnetischen Stromkreise beeinflufst werden. Von der vorbeschriebenen Anordnung unterscheidet sich die in Rede stehende durch Isolierung der magnetischen Felder. Dort tritt nämlich eine gewisse Vermischung der Kraftlinien der

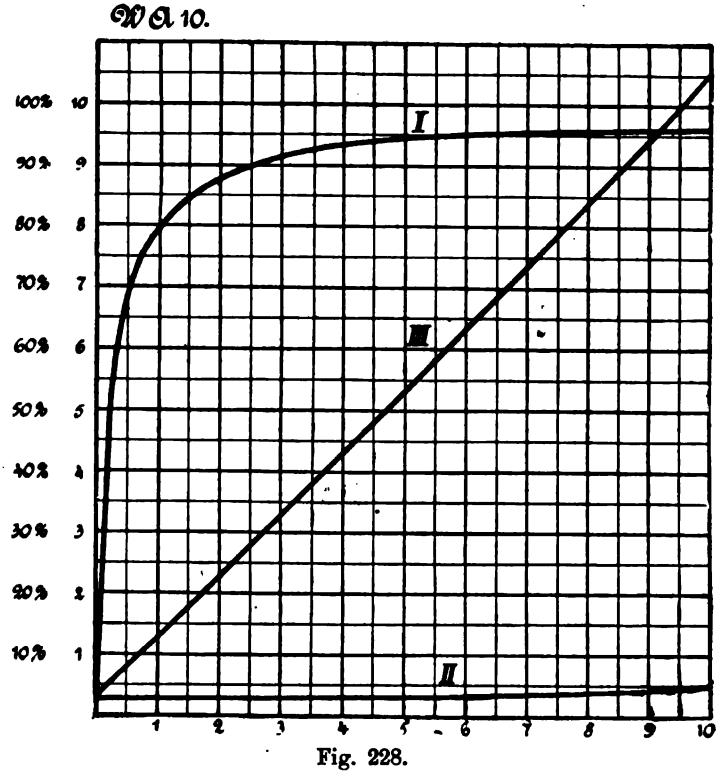


Fig. 228.

beiden Kreise auf, was Phasenverschiebung, geringeren Nutzeffekt etc. veranlafst, welche Übelstände durch die unabhängige Anordnung der magnetischen Felder vermieden werden soll.

Ein Transformator für dreiphasigen Drehstrom von jener Type, wie dieselbe seiner Zeit bei der Frankfurter Anlage 1891 in Verwendung stand, besteht aus drei, in den Ecken eines Dreiecks aufgestellten Eisenkernen, welche von oben und unten mit drei-

eckigen oder runden schmiedeeisernen Schlufsplatten zusammengehalten werden. Direkt an den Eisenkernen liegen die dicken Windungen, aufserhalb die dünnen Wickelungen, die entweder in Dreieckschaltung, zumeist aber wohl nach der Sternschaltung verbunden sind.

Die von der A. E.-G. in neuerer Zeit gebauten Transformatoren werden normal für ein Übersetzungsverhältnis von 120 : 1000, 120 : 2000 oder 120 : 3000 hergestellt und können für

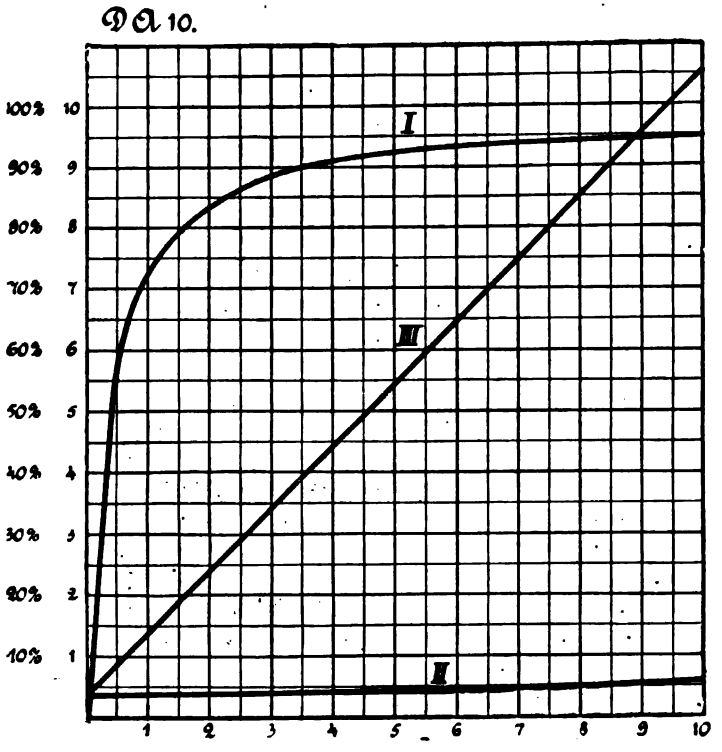


Fig. 229.

alle Wechselzahlen von 80 bis 150 Verwendung finden. Wie sich die A. E.-G.-Transformatoren in Bezug auf den Wirkungsgrad verhalten, zeigen die Kurven der Abbildungen Fig. 228 und 229. Die Werte der Fig. 228 beziehen sich auf einen Wechselstrom-Transformator W. A 10 (Fig. 230, Seite 296) für 10 Kilowatt Nutzleistung. Das Übersetzungsverhältnis ist 120 : 2000, die Polwechselzahl 100 per Sekunde. Wie die Kurve I zeigt, erreicht

der Wirkungsgrad bei Vollbelastung den Wert von 96 %, während derselbe bei halber Belastung 94,1 % beträgt. Die Kurve II giebt den totalen Wattverlust des Transformators bei verschiedenen Belastungen an, während die Kurve III den totalen Wattverbrauch (primär) zeigt. Die Werte der Fig. 229 beziehen sich auf einen Drehstrom-Transformator D. A. 10 (Fig. 231) für 10 Kilowatt Nutzleistung. Dieser Transformator besitzt ebenfalls ein Übersetzungsverhältnis von 120 : 2000. Die Polwechselzahl war 100 per Sekunde. Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung beträgt, wie die Kurve I zeigt, 94,8 % und bei halber Belastung noch 92,3 %.

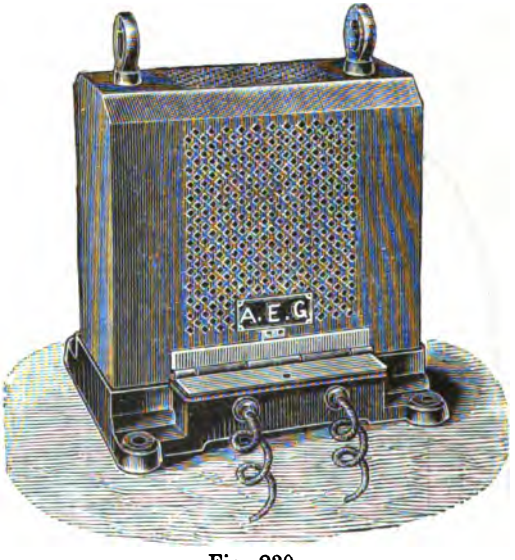


Fig. 230.

Die Kurve II giebt wiederum den totalen Wattverlust und die Kurve III den totalen Wattverbrauch (primär) des Transformators bei verschiedenen Belastungen an.

Da die Gröfse des Spannungsabfalles von Null bis zur Vollbelastung eines Transformators von mindestens gleicher Bedeutung für eine elektrische Anlage sein kann wie der Wirkungsgrad, und um die Notwendigkeit eines Nachregulierens der Spannungen der einzelnen Leitungszweige zu vermeiden, sind die Transformatoren derartig dimensioniert, dafs der Spannungsabfall bei den Gröfsen bis 5 Kilowatt etwa 3 bis 2 % nicht übersteigt, bei den-

jenigen bis 50 Kilowatt ca. 2 bis $1^1/_2$ % und über 50 Kilowatt nur noch 1% ausmacht.

Nachdem in solchen Transformatoren sehr hohe Spannungen auftreten, müssen alle Teile sehr leicht zugänglich sein. Es ist nicht ausgeschlossen, dafs sie — die zwar gar keiner Regulierung noch Wartung bedürfen — doch eventuell ausgewechselt werden müssen, wenn sie z. B. durchgeschlagen worden sind, was infolge eines Isolationsfehlers, oder bei übermäfsig hoher Spannung, oder bei Gewitter vorkommen kann. Oft genügt es übrigens, auch nur ein Element des Apparates auszuwechseln. Die A. E.-G.-Type

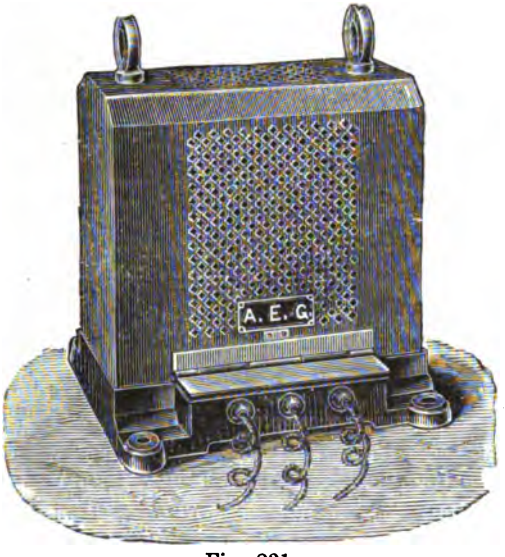


Fig. 231.

besteht daher aus drei bis fünf einzelnen Eisenkernen, die nur durch zwei Klemmbacken und vier eiserne Zugstangen zusammengehalten werden. Nach Lösen von vier Muttern ist der ganze Transformator in seine einzelnen Teile zerlegt und kann alsdann jede beliebige Spule sofort ausgewechselt werden. Um die Gefahr des Durchschlagens praktisch auf das geringste Maafs zu beschränken, ist die Hochspannungswickelung von der Niederspannungswickelung sowohl wie vom Eisen durch eine 5 mm starke Schicht Mikanit getrennt, während zwischen Niederspannungswickelung und Eisenkern eine 3 mm starke Schicht Stabilit liegt. Die Zusammensetzung des Transformators ist ebenso

einfach als schnell zu bewerkstelligen, wie das Auseinandernehmen und kann von jedem Arbeiter leicht ausgeführt werden. Gegen äufsere Beschädigungen sind die Transformatoren durch einen teilweise perforierten Eisenblechmantel geschützt. Die Anschlussklemmen sind in zwei kleinen durch Deckel verschliefsbaren, an das Transformatorengehäuse angegossenen Kästen untergebracht und ist die Anordnung so getroffen, dafs die Klemmen für die Hochspannungsleitungen auf der einen Seite und die für die Niederspannungsleitungen auf der anderen Seite liegen.

Auch bei den einfachen Wechselstrom-Transformatoren sind für die Niederspannungsleitungen drei Klemmen vorgesehen, um auch die halbe Spannung zur Verfügung zu haben. Diese Anordnung der dritten sekundären Leitung empfiehlt sich bei Bogenlichtbetrieb oder bei etwas höherer Spannung für das Dreileitersystem. (Siehe die nebenstehende Tabelle.)

Während früher die transformierende Verschiebung des Magnetismus nur in einem einzigen Kreise erfolgte, wird in den neueren Konstruktionen ein Kreisen der magnetischen Achse um den Mittelpunkt eines Eisenkörpers (siehe Fig. 1 Tafel VI) veranlafst, wobei im Mittelpunkte ein stets gleich hoher nur in seiner Richtung wechselnder Betrag von Magnetismus zurückbleibt. Dadurch entstehen in den sekundären Spulen Ströme, die entweder jeder für sich oder beliebig zusammengeschaltet werden können. Die gegenseitige Lage der sekundären und primären Spulen ist dabei ohne Belang, man kann die Spulen nebeneinander oder übereinander anordnen. Das Wesentliche dabei ist die eigenartige Verteilung des Magnetismus in einem Eisenkörper, der aus zwei konzentrischen kreisrunden oder polygonalen Eisenstücken besteht, die durch drei oder mehrere radiale Querstücke mit einander verbunden sind. Während nun in den runden oder polygonalen Teilen ein stets gleich hoher Betrag von Magnetismus von allerdings wechselnder Richtung vorhanden ist, wird in den strahlenförmigen Teilen, ähnlich wie bei den gewöhnlichen Stromumwandlern, der Betrag des Magnetismus stetig durch den Nullwert hindurch vom positiven zum negativen Höhepunkt und umgekehrt schwanken. Erzeugt wird dieser Magnetismus beim Dreiphasensystem durch Wechselströme, welche in ihrer Phase derart verschoben sind, dafs von Augenblick zu Augenblick jeder einzelne von ihnen gleich und entgegengesetzt

Wechselstrom-Transformatoren der A. E.-G.

Leistung in Kilowatt	Spannung in Volt primär	Wirkungsgrad bei Vollbelastung % ca.	Gewicht d. kompletten Transformators Netto kg ca.	Bemerkungen
	Meſs-Transformator		45	Die Transformatoren sind für Übersetzungsverhältnisse 120/1000. 2000. 3000 gebaut und können für alle Wechselzahlen von 80 (40 volle Perioden per Sekunde) bis 150 (75 volle Perioden per Sekunde) verwendet werden.
1	1000	90	70	
2	1000. 2000	92	85	
3	1000. 2000. 3000	93	100	
5	1000. 2000. 3000	94	160	
8	1000. 2000. 3000	95	260	
10	1000. 2000. 3000	96	300	
15	1000. 2000. 3000	96	430	
20	1000. 2000. 3000	97	600	
30	1000. 2000. 3000	97	880	
50	1000. 2000. 3000	97	1450	
75	1000. 2000. 3000	97	2000	
100	1000. 2000. 3000	97	2500	
	(Drehstrom-Transformatoren)			
1	1000	89	100	
2	1000. 2000	90	135	
3	1000. 2000	90	160	
5	1000. 2000. 3000	92	185	
8	1000. 2000. 3000	93	280	
10	1000. 2000. 3000	94	350	
15	1000. 2000. 3000	94	480	
20	1000. 2000. 3000	95	610	
30	1000. 2000. 3000	95	860	
45	1000. 2000. 3000	95	1250	
60	1000. 2000. 3000	96	1650	
80	1000. 2000. 3000	96	2130	
100	1000. 2000. 3000	97	2600	

ist der Summe der beiden anderen, d. h. dafs ihre algebraische Summe in jedem Augenblicke gleich Null ist.

Falls nur wenige (z. B. drei) Querstücke nötig sind, wird man vorteilhaft, ohne den günstigen Verlauf der Kraftlinien zu stören, die Querstücke (Kerne) senkrecht stellen und durch Eisenplatten verbinden, die keine geschlossene Gestalt im Sinne der vorstehenden Erörterung besitzen.

Die Fig. 232 zeigt das Eisengerüst-Schema eines solchen Transformators.

Bei dieser Anordnung verschiebt sich der Magnetismus, dessen Betrag ebenfalls nahezu gleichmäfsig bleibt, parallel zu sich selbst in einer und derselben Ebene. Zur Stromumwandlung

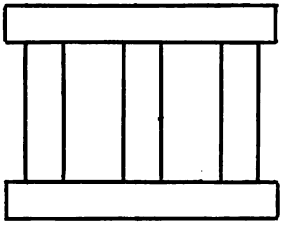


Fig. 232.

von mehrphasigen Strömen kann die Zahl der in einer Ebene parallelen Eisenkernen natürlich noch vermehrt werden. Beim dreiphasigen Drehstromsystem braucht man zum mindesten drei Eisenkerne. Die vorstehend beschriebenen der A. E.-G. patentierten Transformatoren, deren Bilder in den Fig. 230 und 231 gegeben wurden, erfordern nur wenig Raum, sind einfach und billig herzustellen und im Betriebe aufserordentlich bequem; sie haben sich bis jetzt auch trefflich bewährt.

VII. Abteilung.

Schaltungen und Leitungen.

Schaltungen beim dreiphasigen Drehstrome.

Die Anschlüsse der Linienleitungen an die drei Spulen der Drehstrom-Dynamo und die Verbindung der letzteren unter sich können, wie wir schon auf Seite 149 Fig. 106 und 107 gezeigt haben, beim verketteten Drehstrome nach zwei Grundschemas ausgeführt werden:

1. nach der Sternschaltung, auch offene Schaltung genannt (Fig. 233),
2. nach der Dreieckschaltung, auch geschlossene Schaltung genannt (Fig. 234).

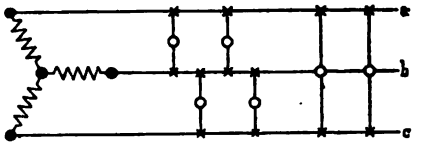


Fig. 233.

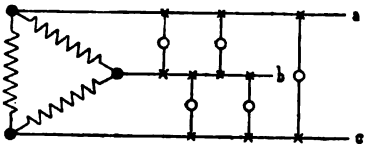


Fig. 234.

Wie wir später erörtern werden, hat sich aber noch eine dritte Schaltung unter Umständen als vorteilhaft erwiesen und zwar:

3. die Sternschaltung mit Nullleitung (Fig. 235).

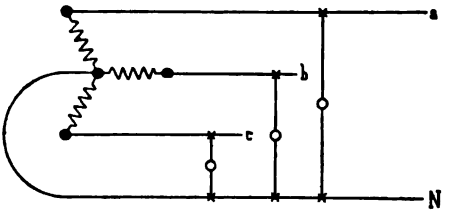


Fig. 235.

Die Schemata sind wohl ohne weiteres verständlich; es ist also nur mehr wichtig, die Spannungsverhältnisse zwischen den einzelnen Zweigen zu betrachten.

Nachdem jede in einer Spule erzeugte Spannung gleich und entgegengesetzt ist der Summe der beiden anderen (siehe Sinus-

kurvenapparat Seite 134 Fig. 96), ferner die algebraische Summe der drei Ströme bezw. Spannungen gleich Null ist, während die Summe der absoluten Beträge zwischen $2i$ und $1{,}732\,i$ schwankt — wie sofort erörtert werden soll —, so kann man offenbar sowohl hintereinander als auch parallel schalten, ohne die Verhältnisse wesentlich zu ändern (siehe Seite 161).

Bezeichnen wir bei der Sternschaltung (Fig. 233) die obere Spule mit I, die untere mit II und die mittlere mit III, so ist der Strom I hintereinander mit den parallelen Strömen II und III, ebenso II mit I und III, gleichwie III mit I und II geschaltet.

Bezeichnen wir bei der Dreieckschaltung die vertikale Spule mit II, und von den beiden anderen die obere mit I, die untere mit III, dann ist die

Spannung von I gleich der Spannung von II + III,
„ „ II „ „ „ „ I + III und
„ „ III „ „ „ „ I + II.

Infolgedessen kann I mit den hintereinander geschalteten Spulen II und III als parallel geschaltet angesehen werden, II mit I und III u. s. f.

Bei der Sternschaltung fliefst zwischen den Leitungen $a\,c$ ein Strom, der in den Spulen I und II erregt worden ist. Weil aber die Maxima der beiden Spannungen nicht zusammenfallen, sondern einen Abstand von 60° haben, so erhalten wir auch nicht $2\,E$, sondern $2\,E \sin 60° = 1{,}732\,E$.

Die resultierende mittlere Spannung verhält sich also zur Summe der einzelnen mittleren Spannungen wie 1,732 : 2 und mufs die Maschine, wenn eine bestimmte Spannung in der Leitung erzielt werden soll, im umgekehrten Verhältnisse (2 : 1,732) mehr Windungen erhalten, als wenn die Ströme einzeln addiert würden. Entsprechen noch dazu die Ströme nicht der idealen Sinuslinie, die wohl sehr selten zu erreichen sein dürfte, dann wird jenes Verhältnis noch ungünstiger.

Fast gleiche Erscheinungen beobachten wir aber auch bei der Dreieckschaltung, nur ist hier das im vorstehenden Absatze von den Spannungen Gesagte im gleichen Sinne auf die Stromstärken zu beziehen (siehe Seite 161).

Nachdem jede der drei Leitungen zwei benachbarten Stromkreisen dient, so sind Messungen und Regulierungen bei dieser

Schaltung mit vielen Schwierigkeiten verbunden, und diese Schwierigkeiten häufen sich bei ungleichen Belastungen der Zweige. Um diese Mängel zu beseitigen, hat Dobrowolsky folgende Einrichtung getroffen: Aus einer Dynamo-Maschine werden auf drei Leitungen mehrere (zumeist sechs, wie es das Diagramm Fig. 104 Seite 147 anzeigt) Ströme entsendet. Je mehr Ströme, desto besser ist die Maschine ausgenutzt, weil sich mehr Windungen an der elektromotorischen Erregung beteiligen können. Die von Dobrowolsky konstruierten Drehstrom-Dynamos ermöglichen eine gleichmäfsige Energieabgabe, weil die arithmetische Summe der einzelnen Ströme konstant ist. Anfangs wurden die von den Maschinen gelieferten unverketteten Ströme durch die Hilfsapparate geführt und dann ausgenutzt. Soll die Energie auf gröfsere Entfernungen übertragen werden, dann mussten die dreiphasigen Drehströme allerdings im Transformator verkettet werden, Dobrowolsky spaltete dieselben aber wieder, wenn er sie nach der zweiten Transformation der Ausnutzung zuführt.

Bei dieser Transformation dreier verketteter Ströme, welche 120° Phasenabstand haben, wird infolge der Verkettung ein Verlust von 15% Spannung eintreten, denn hier ist der Transformationskoeffizient nicht gleich dem Verhältnisse der Windungszahlen. Man kann aber diesen Verlust umgehen, wenn man die Windungszahlen für die sekundären verketteten Ströme um 15% vergröfsert.

Zur Berechnung der Leistungen in Drehstromanlagen dienen folgende Erörterungen:

Bezeichnen wir bei der Sternschaltung mit

$$E_1\ E_2\ E_3 \text{ die Spannungen zwischen } \begin{cases} a \text{ und } b, \\ b \text{ „ } c, \\ c \text{ „ } a, \end{cases}$$

mit $J_1\ J_2\ J_3$ die in den Leitungen a, b und c auftretenden Stromstärken und mit φ die Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom, dann ist unter der Voraussetzung, dafs

$$E_1 = E_2 = E_3,$$
$$J_1 = J_2 = J_3,$$
$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3,$$

die Summe der Leistungen

$$\Sigma A = E_1 J_1 \cos\varphi_1 + E_2 J_2 \cos\varphi_2 + E_3 J_3 \cos\varphi_3$$
$$= 3\,E\,J\cos\varphi.$$

Die mittlere Energie eines Wechselstromes ist gleich dem Produkte aus seiner effektiven Spannung in die effektive Stromstärke, multipliziert mit dem Cosinus des zwischen beiden bestehenden Phasenverschiebungswinkels.

Betrachten wir den Zweig $a\,b$ in Fig. 233, so sehen wir in demselben zwei gleichgrofse Erregerspulen; wir können aber nicht etwa aus denselben die Summe von zwei gleichgrofsen elektromotorischen Kräften (ε) erwarten, denn es ist zu berücksichtigen, dafs die Ströme 120° von einander abstehen und wir erhalten daher zwischen $\left\{\begin{matrix} a \text{ und } b \\ b \quad „ \quad c \\ c \quad „ \quad a \end{matrix}\right\}$ nicht $2\,\varepsilon$, sondern

$$E = 2\,\varepsilon \cos \frac{180^0 - 120^0}{2} = \sqrt{3}\,\varepsilon$$

und es ist für einen geschlossenen Stromkreis:

$$A = \sqrt{3}\,\varepsilon\, J \cos \varphi.$$

Der Phasenverschiebungswinkel φ ist aber auch keine konstante Gröfse; er ändert sich vielmehr ganz aufserordentlich mit der Art der betriebenen Objekte. Es kommt bekanntlich sehr darauf an, ob induktionsfreie oder Maschinen mit Selbstinduktion eingeschaltet werden.

Wir können nur die Glühlampen als induktionsfreie Widerstände annehmen und in diesem Falle wird $\cos \varphi = 1$, d. h. die Verhältnisse sind ungefähr dieselben wie beim Gleichstrom, wo auch die Energie durch das Produkt Volt-Ampère angegeben wird.

Widerstände aber, in welchen Multiplikationsspulen vorkommen (also Motoren), haben mehr oder weniger Selbstinduktion; diese veranlafst eine Phasenverschiebung zwischen Spannungs- und Stromkurve, die trigonometrische Funktion $\cos \varphi$ erhält einen Wert geringer als 1 und die an den Messinstrumenten abgelesenen Werte sind nur **scheinbare Volt — scheinbare Ampère** — das Produkt aus beiden **scheinbare Watt**; letztere müssen noch mit $\cos \varphi$ multipliziert werden, um die **wirklichen Watt** zu ermitteln.

Elektromotoren arbeiten zumeist mit einem

$$\cos \varphi = 0{,}7 \text{ bis } 0{,}85.$$

Wenn also bei einem Motor angegeben ist, dafs er mit

$\cos \varphi = 0{,}75$ arbeitet, so soll damit angedeutet sein, dafs er bei normaler Leistung und normaler Spannung 25 % mehr Ampère braucht, als seinem nach der wirklichen Leistung (PS durch Wirkungsgrad) berechneten Wattverbrauch entsprechen würde.

Besonders bei der Berechnung der Dynamomaschine, dann aber auch der Hilfsapparate und Leitungen ist das wohl zu berücksichtigen, bleibt aber ohne Einflufs bei der Gröfsenbestimmung des in der Anlage zu verwendenden Primärmotors (Dampf-, Wasser etc.), bei welchen die scheinbaren Watt der Berechnung zu Grunde gelegt werden dürfen.

Wichtig ist es auch, sich immer daran zu erinnern, dafs die Maximalspannung bei unbelasteter Maschine zumeist etwas kleiner wird, als bei belasteter Maschine und zwar ist in letzterem Falle die Maximalspannung immer noch etwas gröfser, als jene eines Sinusstromes von gleichem mittleren Effekte.

Verwendet man eine sogenannte Nullleitung, Fig. 235 Seite 301, was nur bei Verwendung dreiphasigen Drehstromes mit offener Verkettung möglich ist und dann erhält man bezüglich der Spannungen folgende Verhältnisse:

Die Spannungen von a bis b,
b „ c,
c „ a
sind $\sqrt{3} = 1{,}732$ mal so hoch als die Spannungen zwischen
N bis a,
N „ b,
N „ c.

Hat man z. B. zwischen N bis a eine Spannung von 110 Volt, dann ist die Spannung zwischen a bis $c = 1{,}732 \times 110 = 190$ Volt.

Mit Beziehung darauf unterscheidet man

1. die Hauptspannung, d. i. jene, welche zwischen zwei Hauptleitungen herrscht und
2. die Phasenspannung, d. i. jene, welche zwischen einer Hauptleitung und der Nullleitung besteht.

Es wird schon bei der Besichtigung des Schemas Fig. 235 klar, dafs die Phasenspannung kleiner sein mufs als die Hauptspannung, weil im letzteren Falle der Kreis durch zwei Erregerspulen, im ersteren Falle aber nur durch eine Erregerspule geschlossen ist.

Die A. E.-G. baut laut ihrer Preisliste Dynamos zu 70/120 Volt und 120/200 Volt, d. h. wenn zwischen der Nullleitung und einer Hauptleitung der kleinere Wert des Verhältnisses gewählt wird, dann herrscht zwischen den Hauptleitungen eine Spannung, welche durch die höhere Ziffer angezeigt ist.

Das Dreileitersystem bei Gleichstromanlagen bietet so viele Vorteile, dafs man, und zwar mit bestem Erfolge, versuchte, auch beim einfachen Wechselstrombetriebe drei Leiter (2 Aufsenleiter und eine Nullleitung) anzuwenden, um auch hier eine weitere Ersparnis an Leitungsmateriale zu erzielen. Beim Wechselstrome bietet sich noch der besondere Vorteil, dafs man dabei unter allen Verhältnissen mit einer einzigen Maschine auskommen kann. Man führt dann die Enden der Ankerwickelung zu den beiden äufseren Leitungen, während man die Mitte jener Wicke-

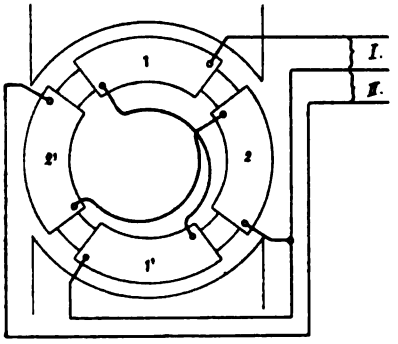


Fig. 236.

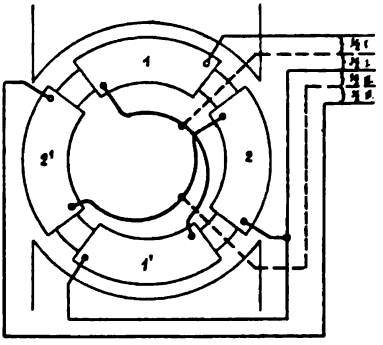


Fig. 237.

lung mit der Nullleitung des Dreileitersystems verbindet. Es ist wohl klar, dafs auch in diesem Falle die mittlere der drei Leitungen stromlos werden kann.

Es erscheint aber nicht überflüssig hier ausdrücklich darauf zu verweisen, dafs bei Drehstromanlagen mit drei verketteten Leitern im Gegensatze zu dem üblichen Dreileitersysteme keiner von diesen stromlos wird, selbst wenn die Belastungen zweier Schleifen noch so sehr gleichmäfsig gehalten sind; bei Drehstromanlagen müssen immer alle verwendeten Leiter für den gleichen, vollen Strom berechnet sein.

Die einzelnen Stromkreise einer Zweiphasen-Dynamo können zwar eine gemeinschaftliche Rückleitung haben, wie Schallen-

berger vorschlägt und Fig. 236 zeigt; die Drahtquerschnitte dürfen dabei aber in keinem Teile der Leitung eine Leitungsfähigkeit unter der Normale aufweisen.

Fig. 237 zeigt eine weitere Entwickelung dieser Idee und man würde dadurch den Vorteil erreichen, aus der Maschine höhere Spannungen entnehmen zu können, um im Netze dann zwei verschiedene Spannungen zur Verfügung zu haben; es würde dabei aber nicht nur keine Verminderung des Leitungsmateriales erzielt werden, im Gegenteile, es wäre darnach sogar eine wesentliche Vermehrung dieses Materiales erforderlich. Hat man z. B. zwei Ströme von 90° Phasendifferenz, so kommen zu den drei Hauptleitungen noch zwei neutrale, es werden also fünf, bei drei Stromkreisen sogar sieben Leitungen erforderlich (Fig. 238). Um

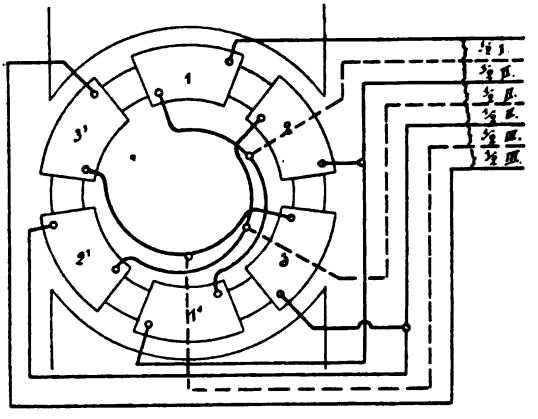


Fig. 238.

diese Mängel zu beseitigen, hat die A. E.-G. schon im Jahre 1890 das in folgendem beschriebene „Elektrizitäts-Verteilungssystem" ausgearbeitet und zeichnet sich dasselbe dadurch aus, dafs man bei drei oder mehr Strömen verschiedener Phase nur eine einzige neutrale Leitung benutzt. Um das zu erreichen, mufs man die Spulen so miteinander verbinden, dafs die in ihnen entstehenden elektromotorischen Kräfte wirklich hintereinander geschaltet sind, und dafs nicht nur für die Ströme eine gemeinsame Rückleitung vorhanden ist. Man erreicht das durch Vertauschung der Enden der Spulengruppen, so dafs dieselben nunmehr einen Strom in umgekehrter Richtung, d. h. gegen früher

um 180° in der Phase verschoben, liefert. Betrachten wir jetzt die Abstände gleicher Stromstöfse, so finden wir, dafs aus den drei Strömen mit je $\frac{\pi}{3} = 60°$ Phasendifferenz nunmehr drei Ströme mit je $\frac{2\pi}{3} = 120°$ Phasendifferenz geworden sind. Folgen diese Ströme dem Sinusgesetze, so ist in jedem Momente die Stromstärke in den verschiedenen Spulengruppen:

$$J_1 = a \sin \varphi,$$
$$J_2 = a \sin (\varphi + 120°),$$
$$J_3 = a \sin (\varphi + 240°).$$

Addiert man nun je zwei dieser Gleichungen, so ergiebt sich, dafs jeder einzelne dieser Ströme gleich der Summe der beiden anderen ist, mit anderen Worten: die algebraische Summe aller drei Ströme ist in jedem Augenblicke gleich Null. Dieser Umstand, den wir auch auf Seite 133 eingehend erörtert haben, bietet die Möglichkeit, alle drei Ströme in einem Punkte zusammenlaufen zu lassen in der Weise, wie es Fig. 239 und 240 schematisch

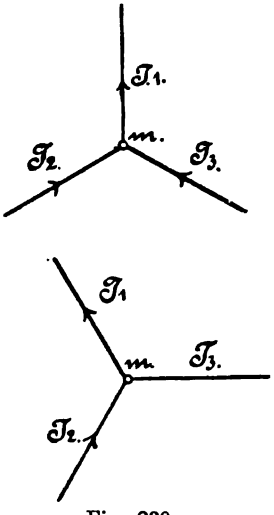


Fig. 239.

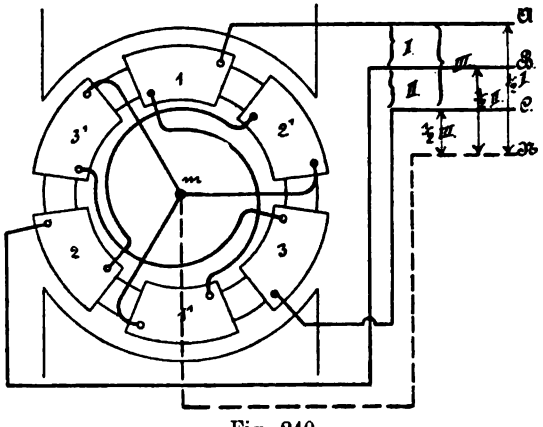


Fig. 240.

zeigen. Die Hauptleitung für diese drei Ströme ist durch die Linien ABC angedeutet. Zwischen je zwei derselben besteht, da die zugehörigen Spulen vollkommen symmetrisch liegen, die gleiche mittlere Spannung (Gleichheit der Spulen vorausgesetzt), und in dem Punkte m wird diese halbiert (falls die Kurve des Wechselstromes keine Sinuskurve ist, so findet dieses nur an-

genähert statt). Wenn man nun mit dem Punkte m eine Leitung N verbindet, so kann man diese als neutrale für je zwei der Leitungen $A\,B\,C$ verwenden, d. h. mit der Leitung N zusammen bilden je zwei der Leitungen ein Dreileitersystem. Die Fig. 241 und 242 zusammen betrachtet, veranschaulichen die Anordnung

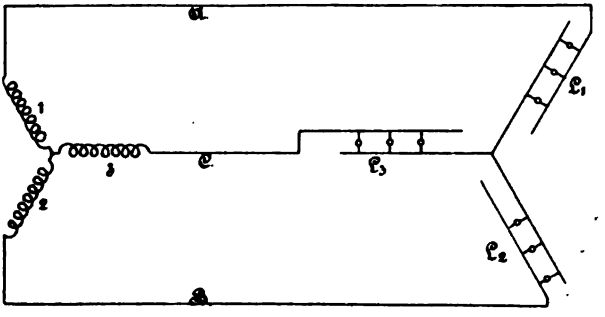


Fig. 241.

noch deutlicher. 1, 2 und 3 stellen schematisch die stromerzeugenden Spulen, $A\,B$ und C die Leitungen und $L_1\,L_2$ und L_3 die drei von der Maschine gespeisten Lampengruppen dar. In Fig. 241 ist die Belastung aller Gruppen gleich. Die Ströme verteilen sich, wie oben erklärt, so, dafs die einzelnen Lampen-

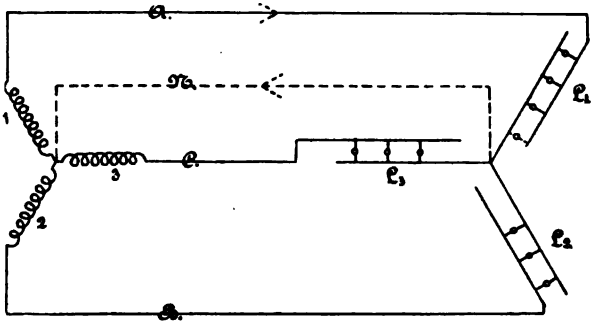


Fig. 242.

gruppen ihr Strommaximum der Reihe nach erhalten, wie es aus der Phasendifferenz von 120° der Wechselströme hervorgeht. Ist z. B. L_1 im Maximum, so fliefst der Strom von A durch L_1 und verzweigt sich durch L_2 und L_3, um dann durch B und C zurückzukehren. Im nächsten Momente sinkt der Strom in L_1 und L_2,

und es erhält L_3 das Maximum etc. Die Leuchtkraft der Lampen bleibt wegen der raschen Wechsel natürlich ebenso gleichmäfsig, wie bei gewöhnlichem Wechselstrome. Falls nun aber in L_1 mehr Lampen eingeschaltet werden, so wird die Gleichheit der Leuchtkraft gestört, denn es würden dann hintereinander geschaltete Gruppen von ungleicher Lampenzahl entstehen. Nimmt man aber, wie in Fig. 242, noch die früher beschriebene „Neutrale" dazu, so findet der Stromüberschufs von L_1 seinen Weg durch die Ausgleichsleitung N in gleicher Weise, wie im gewöhnlichen Dreileitersystem. Das Ganze ist daher eine Vereinigung von Dreileitersystemen, welche Wechselströme von 120° Phasendifferenz führen.

Durch diese Anordnung kann man erstens in derselben Weise, wie bei jedem anderen Dreileitersystem, aus dem Kabelnetz zwei verschiedene Spannungen entnehmen, je nach dem Bedürfnis der anzuschliefsenden Nutzwiderstände (Lampen, Treibmaschinen etc.). Ferner ermöglicht die Ausgleichsleitung beim Betriebe mit Wechselströmen verschiedener Phase eine Nachregelung der Spannung in jedem Stromkreise (in später beschriebener Weise), ohne dafs dadurch die anderen Stromkreise beeinflufst werden, was sonst nur durch vollständige Trennung der Stromkreise zu erreichen ist (Tesla, D. R.-P. Nr. 47889).

In derselben Weise, wie bei unmittelbarer Fortleitung der Wechselströme von der Maschine zu den Nutzwiderständen, kann man das beschriebene System auch dann durchführen, wenn die Verteilung unter Zuhilfenahme von Stromumwandlern geschieht. Man wendet in diesem Falle auch in den sekundären Stromkreisen Ausgleichsleitungen an, da die primären Ströme den sekundären nahezu proportional sind. Falls man den gesamten Arbeitsstrom umwandeln will, führt man alle vier Leitungen zum Umwandler, die dafür erforderliche Schaltung der Spulen und deren Anschlufs an die Leitungen sind aus den schematischen Zeichnungen T_1 und T_2 in Fig. 243 ersichtlich.

Die von diesem Verteilungssysteme aus gespeisten Elektromotoren können verschiedener Art sein; sie haben jedoch alle eine Schaltung der Spulen, welche der oben beschriebenen des Generators gleich oder analog ist (M in Fig. 243). Da im allgemeinen der Stromverbrauch in allen Spulen der Treibmaschine derselbe ist, so brauchte man ihn nur an die drei Hauptleitungen

anzuschliefsen; es empfiehlt sich jedoch besonders, wenn die Belastung der Treibmaschine häufig und plötzlich wechselt, den Kreuzungspunkt *m* der Spulengruppen der Treibmaschine an die Ausgleichsleitung *N* anzuschliefsen, da die Ungleichmäfsigkeiten sich dann weniger bemerkbar machen; man hat dann auch den Vorteil, dafs eine etwaige Beschädigung einer oder zweier (unter Umständen auch dreier) Spulen nicht sofort ein Stehenbleiben der Treibmaschine zur Folge hat. In Fig. 243 ist unter *M* schematisch die Schaltung und der Anschluſs der Spulen der Treibmaschine an die Leitungen gezeigt, wobei der Deutlichkeit wegen die übrigen Teile der Maschine weggelassen sind.

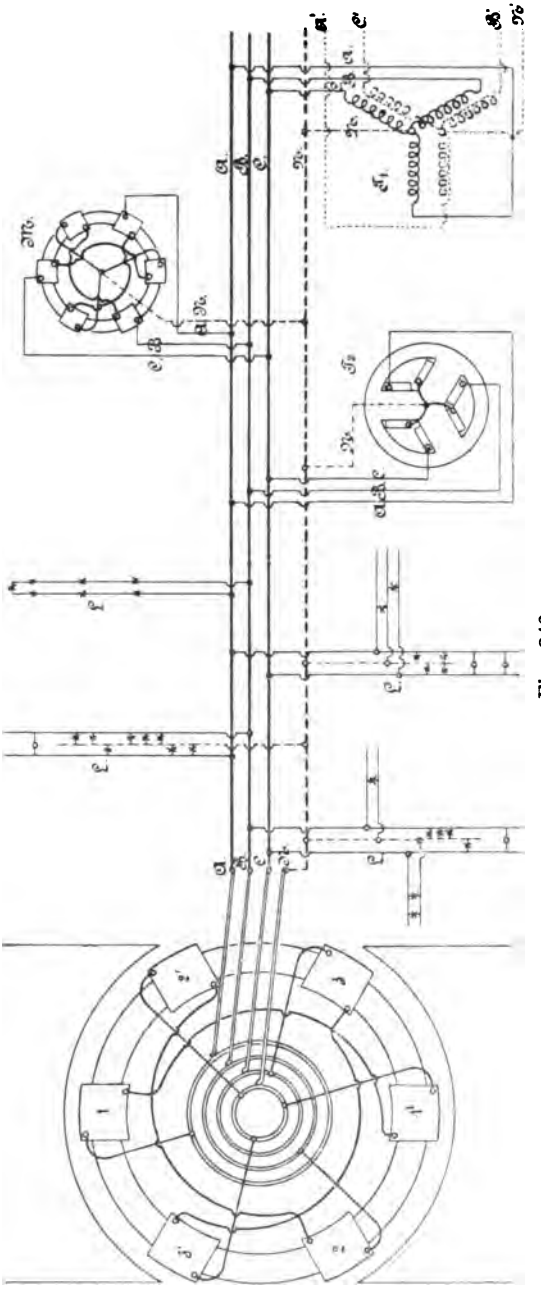


Fig. 243.

Das Prinzip,

durch Wechselströme verschiedener Phase eine Drehung hervorzubringen, kennen wir; hervorzuheben ist hier nur die eigentümliche Schaltung der Spulen, wodurch ein neutraler Punkt entsteht, welcher den Anschluſs an die Ausgleichsleitung ermöglicht.

Zu den Eigentümlichkeiten dieses A. E.-G.-Systems gehört auch die Möglichkeit, nach der man den bei langen Leitungen unvermeidlichen Spannungsabfall ausgleichen kann. Die dazu dienende Vorrichtung ist in Fig. 244 schematisch dargestellt; s_1 s_2 und

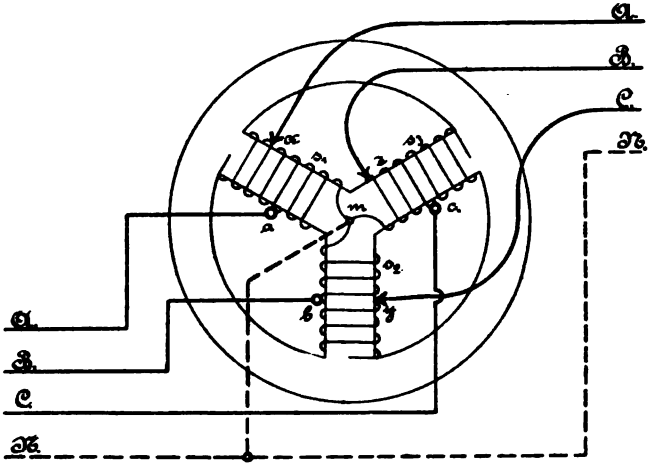


Fig. 244.

s_3 sind Spulen, die um die Schenkel eines Eisenkörpers gewickelt sind und an einem Punkte m miteinander und mit der Ausgleichsleitung N verbunden sind. Die Hauptleitungen $A\,B\,C$ haben dagegen ihre Anschlüsse in $a\,b\,c$. Die drei Fernleitungen werden durch Vermittelung der Schleifstromschluſsstücke $x\,y\,z$ an eine bestimmte Windung der betreffenden Spule angelegt, deren Entfernung von dem Verbindungspunkte m sich darnach richtet, ob man die Spannung der Fernleitung gegen die der Maschine vergröſsern, gleich lassen oder verringern will. Die Ausgleichsleitung bewirkt hierbei die Unabhängigkeit der einzelnen Stromkreise von einander. Anstatt die Stromschluſsstücke $x\,y\,z$ mit den Spulen s_1 s_2 s_3 zu verbinden, kann man auch die Vorrichtung mit einem Stromumwandler vereinigen und die Fernleitungen an die sekundären Spulen anlegen, welche beispielsweise über s_1 s_2 s_3 gewickelt sind. Dieses Verfahren wäre dann anzuwenden, wenn

die Maschine wesentlich andere Spannungen liefert, als die Nutzwiderstände sie bedürfen. Es ist selbstverständlich, dafs man auch die Fernleitungen fest mit einem Punkte der Spule verbinden und dafür die von der Maschine kommenden Leitungen in Schleifstromschlufsstücke endigen lassen kann.

Ebenso, wie bei einem gewöhnlichen Dreileitersystem, kann es auch bei der beschriebenen Anordnung vorkommen, dafs die Belastung sich auf die einzelnen Stromkreise ungleichmäfsig verteilt und es mufs bei der Anlage auf diesen Punkt Rücksicht genommen werden; man kommt aber trotzdem für die neutralen Leitungen auch hier mit viel geringeren Drahtstärken aus, als die Hauptleitungen sie nötig machen.

Das beschriebene Elektrizitäts-Verteilungssystem ist zwar hier nur mit drei Hauptleitungen und einer neutralen angenommen, allein man kann in derselben Weise auch 4, 5, 6 . . . n Leitungen mit einer einzigen neutralen verbinden, wobei zwischen je zwei Strömen eine Phasendifferenz von $\frac{2\pi}{n}$ besteht. Alle diese n Ströme würden in einem Punkte vereinigt, und an diesem eine einzige Neutrale angeschlossen. Bei den Skizzen ist hier immer eine zweipolige Maschine angenommen worden, während selbstverständlich eine mehrpolige Maschine sich in derselben Weise schalten läfst. Man hat nur die symmetrisch zu den Polen gelegenen Spulen miteinander zu Gruppen zu verbinden.

Eine ganz ähnliche Erörterung brachte v. Dobrowolsky zur Bestimmung der Leitungsquerschnitte für einen verketteten Drehstrom schon im Jahre 1890. Dabei ist es vor allem erforderlich, dafs man sich über die von dem Komplexe der drei Leitungen übertragene Energie Klarheit verschafft; mit anderen Worten, es soll zunächst die Frage beantwortet werden: wie grofs ist die totale Energie, wenn wir Spannung und Stromstärke gemessen haben. Diese Frage braucht zunächst nur vergleichsweise mit gewöhnlichem Wechselstrome gelöst zu werden, und wir wollen dabei annehmen, dafs die konsumierenden Apparate ohne Selbstinduktion sind, d. h. keine Verschiebung des Stromes gegen die Spannung verursachen. Tritt dieselbe jedoch auf, so sind die dadurch modifizierten Verhältnisse die gleichen beim Drehstrome wie beim Wechselstrome. Ferner wollen wir den Fall in das Auge fassen, wo die Belastung der drei Zweige die

gleiche ist, da nur die volle normale Belastung bei der Bestimmung des Leitungsquerschnittes in Betracht kommt. Fig. 245 zeigt uns eine Leitung mit verkettetem Drehstrome, in welcher die Stromstärke J bei der Spannung e herrscht. Es bedeutet dabei J entweder die maximale oder die effektive oder die mittlere Stromstärke, nicht aber die jeweilige, momentane. Die Belastung sei durch die drei gleichen Stromzweige i_1 i_2 i_3 dargestellt. Der Stromverlauf ist, wie wir bereits früher dargethan haben, stets so, daſs jeder der Ströme J in den beiden anderen seine Rückleitung findet, und daſs die Strommaxima in den Leitungen in einem Abstande von 120° aufeinander folgen. Es wird dann J_1 gespalten in i_1 und i_2, J_2 in i_2 und i_3 etc., wobei i_1 gegen i_2 um 60° verschoben ist. Es wird dann

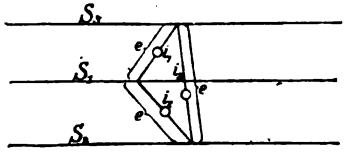


Fig. 245.

$$J = 1{,}732\, i.$$

Es ergiebt sich hieraus andererseits, daſs die Maxima der Ströme J nicht mit denjenigen der Ströme i zusammenfallen, sondern daſs das Maximum von J in der Mitte der Maxima von i_2 und i_3 liegt, der resultierende Strom J also von den einzelnen Strömen i um 30° entfernt ist.

Unter der oben angenommenen Voraussetzung, daſs die Konsumapparate ohne Selbstinduktion sind, findet keine Phasenverschiebung zwischen der Spannung und dem durch sie hervorgerufenen Strome statt, es tritt daher i zugleich mit der Spannung e auf. Dagegen herrscht zwischen e und J ein Phasenabstand von 30°, da J und i um 30° gegeneinander in der Phase verschoben sind. Mit anderen Worten: wir haben beim verketteten Dreiphasenstrome einen Phasenabstand von 30° zwischen dem Strome in der einen Hauptleitung und der Spannung zwischen zwei benachbarten Leitungen. Die gesamte Energie ist $= 3\, i\, e$, d. h. gleich dem Dreifachen von der Energie in einem einzelnen Zweige. Setzen wir nun für i den Wert

$$\frac{J}{2 \cdot \sin 60^0}$$

ein, so erhalten wir für die totale Energie:

$$3\, i\, e = 3 \cdot e \cdot \frac{J}{2 \sin 60^0} = 1{,}732\, J \cdot e,$$

d. h.: führt der verkettete Drehstrom in allen drei Leitungen eine effektive Stromstärke $= J$ mit der Spannung $= e$, so ist die übertragene Energie $= 1{,}732\, J \cdot e$.

Wollen wir nun also bei gleicher Spannung e die gleiche Energie mit Gleichstrom oder Wechselstrom übertragen, so mufs die effektive Stromstärke $= 1{,}732 \cdot J$ genommenwerden. Da aber bei gleicher Leitungslänge und gleichem Spannungsverluste die Querschnitte proportional der Stromstärke genommen werden müssen, so folgt hieraus, dafs, wenn bei Drehstrom drei Leitungen entsprechend dem Strome J je einen Querschnitt $= q$ haben müssen, bei Gleich- oder Wechselstrom zwei Leitungen von $1{,}732\, q$ erforderlich sind. Es ergiebt sich hiermit, dafs man bei Berechnung von Drehstrom-Fernleitungen dieselben zunächst sozusagen für Zweileiterstrom berechnen und sodann den totalen Querschnitt statt auf zwei nunmehr auf drei Drähte verteilen soll, wobei man dann den erhaltenen Querschnitt noch um ca. 12 bis 14% verringern kann. Es folgt also aus der obigen Betrachtung über das Verhältnis des Linien- zum Verbrauchsstrome, dafs man für jedes Ampère im Hauptleitungsbündel (verkettete Drehstromleitung) 0,866 A in jedem der Verbrauchsstromkreise anschliefsen kann. Oder 1 A Drehstrom ist in drei Wechselströme von 0,866 A und derselben Spannung spaltbar und 1 A Drehstrom bei 100 Volt Spannung repräsentiert 173,2 Watt Energie. Wir wiederholen dabei ausdrücklich, dafs obige Verhältnisse nur dann Gültigkeit haben, wenn 1. die Belastung der drei Zweige die gleiche ist, 2. die Belastung induktionsfrei und 3. die Energieen mittels getrennter Ampèremeter und Voltmeter gemessen werden und nicht mittels Wattmeter. In letzterem Falle wird das Produkt $J \cdot e$ kleiner ausfallen, da, wie oben nachgewiesen, zwischen J und e ein konstanter Phasenabstand von 30° besteht.

Alle diese Erörterungen haben übrigens nur in beschränktem Maafse einen Wert für den Betrieb, denn schon die erste der Bedingungen wird praktisch nie oder selten erfüllt sein. Da, wie oben nachgewiesen, in der Zentralstation für Drehstrom die Ströme noch unverkettet, also unabhängig von einander sind, so ist für den regulierenden und überwachenden Maschinisten die Kontrolle der Belastungen sehr einfach zu bewirken. Was die Messung des Konsumes an den Verbrauchsstellen anlangt, so ist dieselbe auch wiederum sehr einfach, da die Verkettung an Ort

und Stelle meist wieder gelöst wird. Die Lampen erhalten nur zwei Leitungen und werden mit einfachen Zählapparaten gemessen, und die gröfseren Motoren erhalten getrennte Stromkreise, deren Konsum mittels geeigneter Wattzähler registriert wird. Bei kleineren Motoren endlich, welche mittels verkettetem Drehstrom gespeist werden, genügt die Messung von einem der Ströme ohne Korrektion auf eventuelle Ungleichheiten der einzelnen Kreise. Man war daher genötigt, zur genauen Bestimmung von Leitungsquerschnitten praktisch verwendbare Formeln aufzustellen und stehen uns derzeit solche — wie wir noch sehen werden — zur Verfügung.

Sollen bei gleicher Spannung e gleiche Energieen einmal mit Gleichstrom, ein andermal mit Wechselstrom übertragen werden, so mufs in der Rechnung bei letzteren die effektive Stromstärke $= 1{,}732\,J$ eingesetzt werden.

Die Querschnitte der Leitungen sind proportional den Stromstärken zu wählen, wenn die Längen der Leitung gleich sind und gleiche Spannungsverluste gestattet werden. Daraus folgt, dafs bei Gleich- oder Wechselstrom zwei Leitungen vom Querschnitte $= 1{,}732\,q$ erforderlich sind, wenn bei Drehstrom drei Leitungen je einen Querschnitt $= q$ haben müssen.

In den ersten Zeiten der Drehstrom-Verwendung hat man thatsächlich die Leitungen auf Zweileitersystem berechnet, die so erhaltenen zwei Werte für die einzelnen Drähte summiert, diese Summe um 14% verringert und dann dieses Resultat durch drei geteilt. Brauchte man z. B. für Gleichstrom zwei Drähte von 8 mm Durchmesser, also

$$2 \cdot 50 = 100 \text{ qmm},$$

so braucht man beim Dreileitersystem zur Beförderung der gleichen Energie drei Drähte von je $\frac{100 - 14}{3} = \sim 29{,}9$ qmm Querschnitt.

Neuerer Zeit rechnet man aber, gestützt auf die gemachten reichlichen Erfahrungen, mit anderen Formeln, und zwar: bezeichnen wir mit:

q den Querschnitt in qmm,
L die Länge der Leitung,
E die Spannung zwischen zwei Hauptleitungen,
p den Wattverlust in Prozent,
W die Wattzahl am Generator,

dann kann man den Querschnitt nach der Formel berechnen:

$$q = \frac{2\,L\,W}{E^2\,p\,(\cos\varphi)^2},$$

wobei man bei induktionsfreien Leitern, also bei solchen für den Betrieb synchroner Motoren und beim Glühlampenbetriebe $\cos\varphi = 1$, bei nichtinduktionsfreien Leitern $\cos\varphi = 0{,}7$ bis $0{,}85$ ansetzen kann [1]). Bei rohen Rechnungen soll man $\cos\varphi$ immer gleich 0,7 annehmen.

Dr. L. Fischer veröffentlicht über die Querschnittsermittelung bei Drehstromanlagen in der E. T. Z. Heft 6 vom 7. Febr. 1895 folgendes:

Bezeichnet man die Summe der Ströme aller Lampenstromkreise in einer Drehstromanlage mit I, so gilt bei der Dreieckschaltung:

$$I = \sqrt{3}\,J,$$

bei der Sternschaltung:

$$I = 3\,J.$$

Bei induktionsfreien Stromkreisen gilt bei der Dreiecksschaltung für den Querschnitt q der Zuleitung:

$$q = \frac{I\,l\,\varkappa}{\Delta E},$$

bei der Sternschaltung:

$$q = \frac{I\,l\,\varkappa}{3\,\Delta E},$$

wenn l die einfache Leitungslänge,

$\varkappa$ den spezifischen Widerstand des Leitungsmateriales und

ΔE den Spannungsverlust bis zu den Abzweigstellen der Lampenkreise bedeutet.

Für Gleichstrom gilt mit diesen Bezeichnungen die Formel:

$$q = \frac{I\,2\,l\,\varkappa}{\Delta E},$$

und vergleichen wir diese mit der Formel für Dreiecksschaltung, so findet man, dafs sich dieselben nur dadurch unterscheiden, dafs

---

[1]) Beispiel: 100 m von der Dynamo entfernt soll ein Drehstrom-Motor von 8 PS (Kraftverbrauch 7000 Watt) betrieben werden. Die Hauptspannung sei 190 Volt, 5% Verlust sei gestattet. Wie grofs mufs der Querschnitt der Leitung sein?

$$q = \frac{2 \cdot 100 \cdot 7000}{190^2 \cdot 5 \cdot 0{,}8} = \frac{1\,400\,000}{128\,400} = \sim 11 \text{ qmm}.$$

beim Gleichstrome die Länge für die Hin- und Zurückleitung eingesetzt werden muſs, was den Wert für q natürlich wesentlich erhöht.

Demnach können sich die Querschnitte der Drehstrom- und Gleichstromleitungen in Summa verhalten wie 1:2 oder in Berücksichtigung der beim Drehstrome nötigen drei Leitungen wie 3:4, was eine Ersparnis von 25% beim dreiphasigen Drehstrome gegenüber Gleichstrome oder einfachem Wechselstrome bedeutet.

Es ist auch hier angenommen, daſs zwischen Strom und Spannung keine Phasenverschiebung eintritt.

Bei der Sternschaltung reduzieren sich die Querschnitte auf den dritten Teil, wenn gleiche Gesamtstromstärken vorausgesetzt und gleiche Spannungsverluste gestattet werden.

Auch H. Görges erläutert in einem öffentlichen Vortrage im Berliner E. T. V., daſs das Drehstromsystem wesentliche Vorteile bezügl. der Leitung bietet, weil durch die Verkettung die Stromstärke und dadurch die Stromwärme bei gleichem Drahtaufwande bedeutend verringert wird.

Durch die Vereinigung zweier gleich starker Ströme wird die Stromstärke nicht verdoppelt, sondern wächst nur auf das $\sqrt{2}$ fache.

Ist der Widerstand eines Drahtes bei vier Leitungen gleich W, bei der Kombination zu drei Leitern gleich W_1, so ist bei gleicher Stromwärme in diesen beiden Leitern zusammen und in der Kombination:

$$2 J^2 W = (\sqrt{2} J)^2 W_1$$
$$W = W_1.$$

Man erhält also in beiden Fällen die gleiche Stromwärme und erspart bei der Kombination, welche durch das Drehstromsystem geboten ist, einen Draht.

Derselbe giebt zur Berechnung von Leitungsquerschnitten die Formel:

$$q = c \frac{i\, 2\, L}{v},$$

wobei c den spezifischen Leitungswiderstand (bei Kupfer $^1/_{50}$ bis $^1/_{60}$),

i die Stromstärke in der Leitung,
L die einfache Länge der Leitung von der Dynamo zur Ausnutzungsstelle und
v den Spannungsverlust ($= i \cdot r$) bedeutet.

Aufgabe: Es sollen 100 PS. (primäre) bei einem in der Leitung gestatteten Verluste von 10 PS. bei einer Spannung von 1000 Volt übertragen werden. Die Leitungen sind zu berechnen.

I. Einphasiger Wechselstrom oder Gleichstrom.

Die Berechnung der Stromstärke erfolgt nach der Gleichung

$$\frac{EJ}{736} = 100 \text{ PS} \quad \text{und daraus} \quad J = 73{,}6 \text{ Ampère.}$$

Der Widerstand der Leitung ergiebt sich aus der Formel:

$$RJ = e$$

oder

$$e = \frac{10 \text{ Pferde}}{2} \times \frac{736}{73{,}6} = 50 \text{ Volt,}$$

und

$$R = \frac{50}{73{,}6} = \mathbf{0{,}68} \text{ Ohm.}$$

Zwischen der Leitung und der Erde herrscht an der Ausgangsstelle eine Potentialdifferenz

$$\frac{E}{2} = 500 \text{ Volt.}$$

II. Dreiphasenstrom (Drehstrom).

Vorerst ist die Gesamtstromstärke, dann die Nutzstromstärke zu berechnen:

Man hat:

$$3 \cdot \frac{EJ}{736} = 90 \text{ Pferde,}$$

da 10 PS in der Leitung verloren gehen. Wir nehmen an, dafs die Stromstärke sich auf die drei Leitungen gleichmäfsig verteilt und erhalten daher pro Leitung eine Nutzstromstärke von

$$J_1 = J_2 = J_3 = 24{,}5 \text{ Ampère.}$$

Der Strom in der Leitung wird also mit

$$1{,}732 \times 24{,}5 = 42{,}434 \text{ Ampère}$$

in Rechnung zu ziehen sein.

Der Energieverlust in jedem der drei Leiter beträgt $\frac{10}{3}$ PS; der Widerstand eines solchen Leiterdrahtes ist daher gegeben in der Formel:

$$J^2 R = \frac{10}{3} \times 736,$$

wobei J mit 42,434 einzusetzen ist,

$$\text{demnach } R = \mathbf{1{,}36} \text{ Ohm},$$

d. h. der Widerstand des Drahtes darf bei dreiphasigem Drehstrome doppelt so grofs sein, als beim Gleich- oder einfachem Wechselstrome; es ist daher beim Dreiphasen-Drehstrome weniger Kupfer nötig, die Leitung wird bedeutend billiger.

Die Kupfergewichte verhalten sich nämlich umgekehrt wie die Widerstände. Im vorstehend gerechneten Falle erhalten wir demnach

$$\frac{3 \times 0{,}68}{2 \times 1{,}36} = 0{,}75.$$

Der Spannungsverlust ist im ersten Falle für einen Leiter:

$$JR = 73{,}6 \times 0{,}68 = 50 \text{ Volt},$$

im zweiten Falle

$$JR = 42{,}43 \times 1{,}36 = 57{,}7 \text{ Volt}.$$

Im allgemeinen gilt wohl der Satz, dafs der Spannungsabfall beim dreiphasigen Drehstrome nur ein Drittel des Abfalles bei einfachem Wechselstrome oder zweiphasigem Drehstrome beträgt; die bezüglichen Abfallsverhältnisse sind aber ziemlich vielgestaltig und bieten vielfache Schwierigkeiten.

Nicht selten tritt beim Wechselstrombetriebe längs der Leitung eine Spannungserhöhung ein und die Anwendung der Rechnungsformel $v = i \cdot r$ ist hier nur bedingungsweise möglich, solange dieses Phänomen und seine begleitenden Umstände nicht völlig aufgeklärt sind. Es kann ja keinem Zweifel unterliegen, dafs auch in der Wechselstromleitung Energie verloren geht, andrerseits ist aber auch das Ansteigen der Spannung beobachtet worden, besonders beim Wechseln der Betriebsobjekte, wenn dabei auch die Ohmschen Widerstände gleichwertig geblieben sind.

Wenn z. B. eine Dynamo 100 Volt liefert, am Ende der Leitung 95 Volt gemessen werden und von dieser Stelle 100 Ampère

zum Betriebe von Glühlampen abfließen, so ändern sich die Spannungsverhältnisse an jener Abnahmestelle sofort, wenn man anstatt der Glühlampen 100 Ampère, diesmal aber zum Betriebe größerer oder kleinerer Motoren entnimmt.

Dort, wo früher 95 Volt gemessen wurden, sinkt jetzt die Spannung auf 85, ja 80 Volt, und kann diese schließlich so herabsinken, daß der anstandslose Betrieb der Motoren fraglich wird.

Man nennt diese Art der Spannungsverminderung den „induktiven Spannungsabfall“ oder die „Drosselung“ und erklärt dieselbe durch den Umstand, daß das Feld um die Leitungen (die Kraftröhren, wie sie Maxwell nennt) dem Stromrichtungswechsel entgegenarbeitet und eine elektromotorische Gegenkraft erregt, so daß dann nur die resultierende Spannung zum Ausdrucke gelangt. Die Dichte der progressiv wachsenden Kraftröhren, und somit die Größe jener elektromotorischen Gegenkraft, hängt aber ab vom Flächeninhalt der durch den Leiter gebildeten Schleife und soll dieser Inhalt möglichst klein gehalten werden. Man wird also Hin- und Rückleitung möglichst nahe aneinander legen und bei Gruppen von Leitungen die zusammengehörigen Ungleichnamigen möglichst nahe aneinander bringen.

Bekanntlich ist die Stromstärke der zweite bestimmende Faktor für die Dichte der Kraftröhren. Obwohl beim Wechselstrombetriebe bedeutende Stromstärken in den Leitungen ohnehin selten vorkommen, so wird man doch nie außer Betracht lassen dürfen, daß geteilte und womöglich konzentrisch liegende Parallelleitungen die auf eine Leitung fallende Stromstärke und somit die Drosselwirkung wesentlich verringern. Bei Zuleitungen starker Ströme für Motoren ist auf diesen Umstand Rücksicht zu nehmen und es empfiehlt sich hier fast immer die Führung von Parallelleitungen um den induktiven Spannungsverlust zu verringern.

Einzelne Leitungen, welche Wechselströme zu führen haben, dürfen daher auch nicht in Eisenröhren (Eisenpanzern) geführt sein, denn das würde die Drosselwirkung erhöhen; es unterliegt dagegen keinem Anstande, zwei bezw. drei Drähte für Hin- und Rückleitung mit Eisenhüllen zu umgeben, aus Gründen, die sich aus dem oben Angeführten wohl von selbst ergeben.

Eines der schwierigsten Kapitel beim Wechsel- bezw. Drehstrombetriebe ist die genaue Vorausberechnung der Wirkungen der Selbstinduktion bezw. des Spannungsabfalles in den verschiedenen Betriebsstadien.

Aufser dem in der ersten Abteilung Angeführten ist diesbezüglich noch zu berücksichtigen:

Bei starker Phasenverschiebung, also bei kleinem cos φ, wird der Einfluſs der Drosselung durch die Leitung bedeutend; immer kommt es aber viel auf die Art der Betriebsobjekte an. Entsteht z. B. bei einer Lichtleitung mit 100 Volt eine Drosselspannung von 10 Volt, so kann das doch eventuell nur einen Abfall der Hauptspannung um 0,5 % zur Folge haben; bei gleichen Verhältnissen in einer Motorenleitung aber wird man bemerken können, daſs der Betrag der Drosselspannung von der Hauptspannung direkt abgezogen werden kann, um die thatsächlichen Spannungsverhältnisse zu bestimmen.

Kennt man den Spannungsverlust in der Leitung (v) und den Spannungsverlust durch Drosselung (d), beide ausgedrückt in Prozenten, so braucht man nur die Summe dieser beiden mit cos φ zu multiplizieren, um den gesamten Spannungsabfall zu bestimmen:

$$\cos\varphi\,(v + d) = V,$$

z. B. $$0{,}7\,(5\,\% + 15\,\%) = 14\,\%.$$

Merkwürdige Verhältnisse erhält man, wenn die Werte von v durch Vergröſserung oder Verkleinerung der Leitungsquerschnitte verändert werden; halbiert man z. B. letzteren, so erhält man nur:

$$0{,}7\,(10\,\% + 15\,\%) = 17{,}5\,\%.$$

Verdoppelt man aber den Leitungsquerschnitt, so beträgt der gesamte Spannungsabfall:

$$0{,}7\,(2{,}5\,\% + 15\,\%) = 12{,}25\,\%.$$

Bei Drehstromanlagen ist es immer wichtig zu unterscheiden, ob dieselben zur Fernleitung mit Hochspannung oder mit der gebräuchlichen Niedrigspannung betrieben werden soll. Die Gewichte der Leitungen verhalten sich aber doch im allgemeinen bei gleichen Spannungen, Verlusten und Leistungen wie:

I. Wechselstrom:

a) Zweileiter . . . 100,
b) Dreileiter . . . 31,25;

II. Zweiphasiger Drehstrom:

a) Vierleiter . . . 100,
b) Dreileiter . . . 72,8;

III. Dreiphasiger Drehstrom:

a) Dreileiter . . . 75,
b) Vierleiter . . . 29,2.

Der Nullleiter ist sowohl bei Ib als auch bei IIIb halb so stark, als die übrigen bezw. Hauptleitungen zu nehmen.

Bei Hochspannungen stellen sich die Verhältnisse noch viel markanter:

I. Wechselstrom:

Zweileiter 100,

II. Zweiphasen-Drehstrom:

a) Vierleiter . . . 100,
b) Dreileiter . . . 145,5;

III. Dreiphasen-Drehstrom:

Dreileiter . . . . 75.

Zweifellos erspart man also beim dreiphasigen Drehstrome an Kupfer und wenn auch der Leitungsbau wegen der nötigen drei Isolatoren, drei Stützen u. s. f. etwas teuerer wird, und auch die dreifachen Hilfsapparate mehr Kosten verursachen als ein Zweileitersystem, die Differenz im Kupferpreise wird das wohl immer im günstigen Sinne ausgleichen.

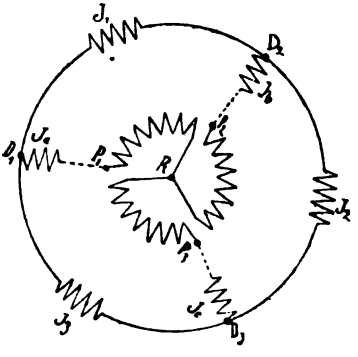


Fig. 246.

Nach einer Darstellung von M. M. Rotten ist durch Fig. 246 die schematische Darstellung einer vollständigen Drehstrom-Arbeitsübertragung, worin R die stromgebende Dynamo (mit Thomson-Houston-Anker) und der äufsere Teil der Figur den Drehstrom-Motor andeutet. Von den Punkten P_1 P_2 P_3 werden drei Wechselströme J_a J_b J_c (Hauptströme) abgenommen, welche durch die drei Leitungen $P_1 D_1$, $P_2 D_2$, $P_3 D_3$ dem Motor zugeführt werden. In die Leitungen PD sind künstliche Widerstände eingeschaltet und werden die in letzteren entstehenden Ströme als „Zweig-

ströme" bezeichnet. Sind nun die Widerstände der einzelnen Zweige PD untereinander gleich, und haben auch die Widerstände der Zwischenleitungen $D_1 D_2$, $D_2 D_3$, $D_3 D_1$ gleichen Wert, dann erhält man respektiv gleiche Stromstärken und sind dieselben auch um gleiche Zeiträume gegeneinander verschoben. In diesem Falle gilt dann die Regel, dafs sich die Ströme $J_a J_b J_c$ zu den Strömen $J_1 J_2 J_3$ verhalten wie $\sqrt{3} : 1$.

Das Polardiagramm Fig. 247 zeigt uns die graphische Darstellung dieser sechs ihrer Phase und Stärke nach besprochenen Ströme. In demselben sind die positiven Richtungen der Ströme durch die ausgezogenen Strahlen, die negativen Richtungen durch die punktierten Strahlen bezeichnet und jeder Strom ist gegen die beiden benachbarten um denselben Betrag (d. i. hier gleich 30°) der Phase nach verschoben.

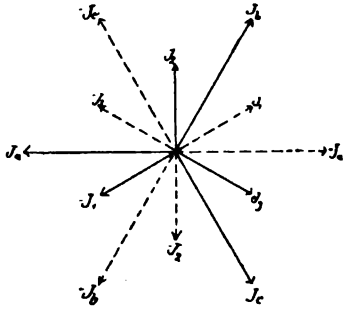


Fig. 247.

M. M. Rotten proponiert gestützt darauf eine Schaltung der Drehfeldmotoren (z. B. nach Schema Fig. 248); denn es ist klar, dafs man diese Ströme zur Erzeugung eines Drehfeldes zusammen wirken lassen kann. Man wird, wie das Schema zeigt, im stande sein, mit drei Leitungen eine zwölfspulige Drehstrom-Maschine zu betreiben, wenn die Windungszahlen derjenigen Spulen, welche die Hauptströme $\pm J_a \pm J_b \pm J_c$ führen, sich zu den Windungen derjenigen Spulen, welche die Zweigströme $\pm J_1 \pm J_2 \pm J_3$ führen, sich verhalten wie $1 : \sqrt{3}$, so dafs dann die Ampère-Windungszahlen aller zwölf Spulen untereinander gleich grofs sind.

Der Gedanke, welcher dieser Konstruktion zu Grunde liegt, ist zweifellos richtig, die praktische Ausführung dürfte sich aber nicht einfach gestalten und einige Schwierigkeiten ergeben.

Projektierung von Drehstromanlagen.

Hat man den Bedarf 1. an mechanischer Kraft bei den Kraftnutzstellen und 2. an Licht genau festgestellt und sich für eine Drehstromanlage entschlossen, so wird zur Aufstellung eines Schaltungsschemas geschritten werden können.

Die Fig. 249 bis 251 zeigen derartige, rein prinzipielle Schemata für mehrphasige Drehstromanlagen.

Man wird immer gut thun, von der Dynamo getrennte Leitungen für Kraft und Licht abzuführen; es wird dadurch eine erfreuliche Unabhängigkeit der beiden Zwecke von einander erreicht und man sichert sich infolgedessen Konstanz der Spannungs-

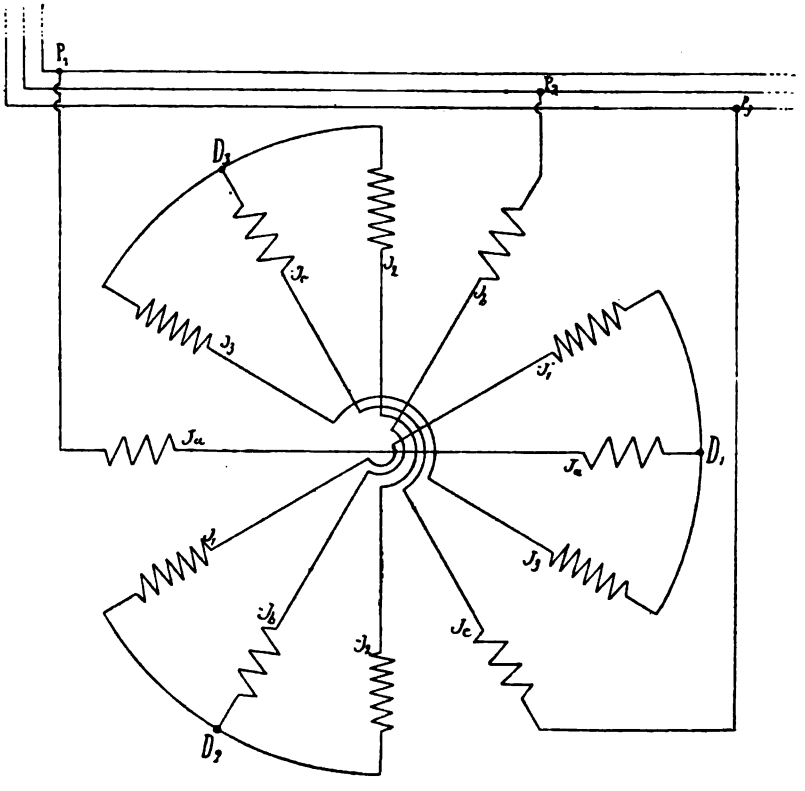


Fig. 248.

verhältnisse im Lichtkreise, wodurch eine gleichmäfsige Lichtentsendung erzielt wird.

Ist dies aber wegen der Länge der Leitungen mit Beziehung auf die Kostenfrage nicht angängig, so ziehe man wenigstens von den Hauptleitungen und Speisepunkten bezw. Transformatoren gesonderte Zuführungen für Kraft und für Licht.

Ist auch dies unthunlich und die Entnahme von Kraft und

Licht aus einer Leitergruppe gar nicht zu umgehen, dann gelten folgende Direktiven:

Ganz kleine Motoren können unbedingt mit Licht zusammengeschaltet werden; sobald jedoch bei der Einschaltung der Motoren die Spannung an den Anfangspunkten der Schleifen um mehr als 3% sinkt, hat man eine Spaltung der Leitungen zu bewirken. Aber auch das gilt nur für Motoren mit gleichmäfsigem Betriebe. Motoren mit intermittierendem Betriebe sind immer in besondere Schleifen zu nehmen.

Der oben gebrauchte relative Ausdruck „klein" ist immer im Verhältnisse zu der Gröfse der Dynamos zu verstehen. Hat man z. B. eine 100pferdige Dynamo, so ist ein 10pferdiger Motor als klein anzusehen und man kann zehn solcher Motoren parallel in einer Schleife betreiben. Hat man aber Motoren in Verwendung zu nehmen, welche mehr als $^1/_{10}$ der Primärkraft erfordern, dann können beim Anlassen wohl infolge des bedeutenden Spannungsabfalles Betriebsstörungen in parallel geschalteten Motoren eintreten, da infolge der Verringerung von E die Motoren grofse Stromstärken aufnehmen und dadurch weiteren Spannungsabfall verursachen. Kann bei solchen Motoren die Verwendung von Leerscheiben nicht gestattet werden, dann bleibt nichts übrig, als im Ankerstromkreise Anlafswiderstände einzuschalten, unter dieser Bedingung kann man aber auch Motoren bis zu $^1/_4$ der Dynamokraft zusammenschalten!

Bei jeder Berechnung einer Drehstromanlage bleibt die Beurteilung der zur Verwendung kommenden Motoren ein höchst schwieriger Punkt, da in diesem Falle, besonders beim Anlaufen der Motoren, recht verwickelte Verhältnisse zwischen Wattverbrauch, Stromstärke und Zugkraft berücksichtigt werden müssen. Die ausführenden Fabriken zögern auch noch über jene Verhältnisse abgeschlossene Urteile auf Grund ihrer Erfahrungen zu veröffentlichen. Diese Schwierigkeiten haben übrigens auch nur für den Konstrukteur Bedeutung; beim Betriebe bewähren sich die Drehstrom-Motoren und das ist die vorläufig Hauptsache.

Im allgemeinen kann man in der Praxis beobachten, dafs beim Anlaufen der Motoren bei normaler Spannung im ersten Augenblicke die vierfache Stromstärke auftritt, die dreifachen Watt verbraucht werden und die doppelte Zugkraft (hier immer mit Beziehung auf das Normale bei Vollbelastung betrachtet)

entwickelt wird. Mit der sich erhöhenden Geschwindigkeit sinkt der Wattverbrauch beim Leerlauf ganz bedeutend (auf ungefähr 10%), der Strom wird aber auch in diesem Falle einen sehr hohen Wert behalten (ungefähr $^2/_3$).

Mit der weiteren Belastung wächst der Wattverbrauch und zwar fast proportional, während der Strom naturgemäfs nur wenig zunehmen kann.

Die Phasenverschiebung zwischen J und E ist also beim Leerlauf bedeutend und es verringert sich dieselbe mit fort-

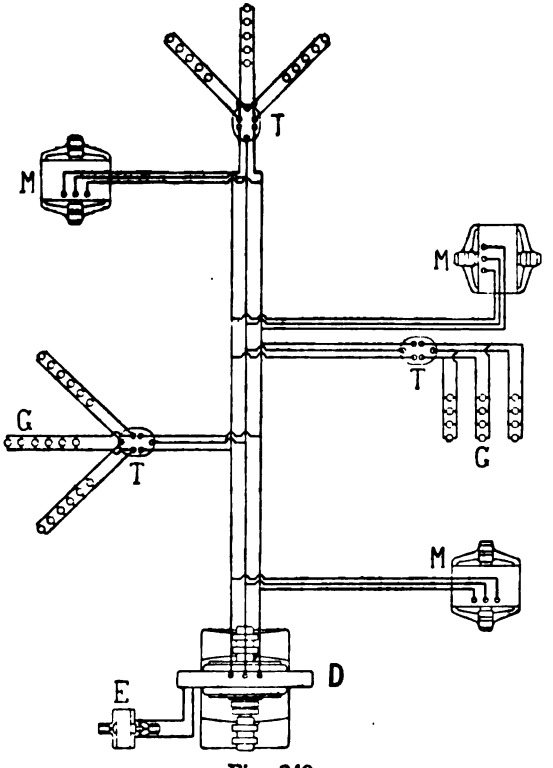


Fig. 249.

schreitender Belastung der Motoren. Der Einfluſs dieses Umstandes auf cos φ ist daher wohl zu berücksichtigen, und was alle diese unzähligen Zwischenphasen auf die Verhältnisse im Hauptstromkreise für Rückschläge ausüben, bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung.

Vorläufig, bis für alle diese Verhältnisse klare Rechnungs-

formeln aufgestellt sind, wird man sich durch eine möglichst reiche Ausstattung der Primärstation gegen Schwankungen in der verfügbaren Energie schützen. Man hatte aber auch noch andere Mittel. Wenn man auf das kräftige Angehen der Motoren verzichten kann, was freilich nicht überall möglich ist, so erreicht man durch Einschalten von Leerscheiben eine Beschränkung der Spannungsänderungen im Netz und eine wesentliche Schonung der Maschinen. Man wird eben bei dieser Anordnung die Motoren leer anlaufen lassen, dabei das Normale bald erreichen und dann erst die Belastung allmählich vornehmen.

Betrachten wir nun die Fig. 249, Seite 327, so ist *D* die Drehstrom-Dynamo, zu welcher selbstverständlich eine kleine Gleichstrom-Maschine *E* zur Erregung des Elektromagnetismus gehört. Von der Dynamo gehen drei Hauptleitungen aus, in welche die Motoren *M* direkt eingeschaltet sind; es zweigen ferner Schleifen zu den Transformatoren *T* ab, die den Strom für die Glühlampen *G* auf die nötige Spannung bringen müssen. Wir haben die Gesichtspunkte bezüglich Einschaltung der Motoren bereits erörtert, bezüglich der Lampen gelten jene Regeln, welche beim Lichtbetriebe mit einfachem Wechselstrome Geltung haben.

Ein ausführliches Schema einer Zweiphasen-Drehstromanlage zeigt die Fig. 250. Aus demselben ist ersichtlich, dafs mit Drehstrom alle möglichen elektrischen Arbeiten verrichtet werden können. Hier werden die in den Dynamos *A* und *B* erzeugten Wechselströme zuerst von nieder auf hoch (*R T*), dann von hoch auf nieder (*L T*) transformiert, damit man in den Leitungen (*L*) an Kupfer érspart. Sämtliche Leitungen führen zu einem Generalumschalter (*F*) und von hier aus wird die elektrische Energie verteilt:

1. Zum Betriebe von Glühlampen, denen Transformatoren (*b*) vorgesetzt werden,
2. zum Betriebe von Motoren (*M*), welche direkt in die vierteilige Leitung eingebunden sind,
3. zum Betriebe hintereinander geschalteter Bogenlampen (*n*), zu welchem Zwecke der Zweiphasenstrom in Gleichstrom von ca. 450 Volt Spannung transformiert wird,
4. zum Laden der Akkumulatoren (*V*),
5. zum Betriebe einer elektrischen Eisenbahn (*K*),

und es wird zu den beiden letzterwähnten Zwecken der Zweiphasenstrom ebenfalls auf den nötigen Gleichstrom gebracht.

Zu diesen Bestimmungen baut man in Amerika besondere

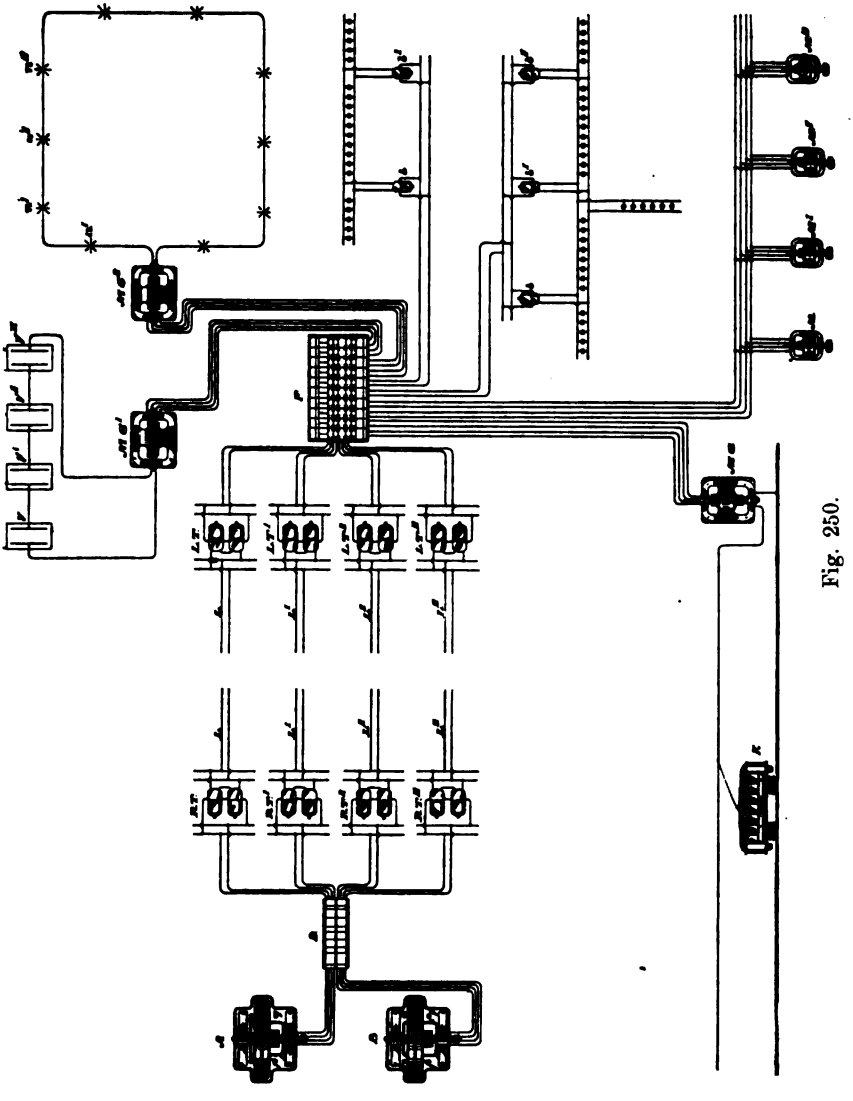


Fig. 250.

Transformator-Maschinen; es ist aber noch nicht bekannt, ob sich dieselben auch bewähren (siehe Seite 332).

Handelt es sich nur um eine Kraftübertragung von einer

Primärmaschine auf einen einzigen Motor, wie dies zumeist bei Kraftübertragungen auf grösere Entfernungen der Fall ist, dann sind die nötigen Einrichtungen zwar einfach, immerhin werden auch dabei zwei Möglichkeiten geboten:

Soll der Motor leer anlaufen und erst nach Bedarf belastet werden, dann sind Anlafswiderstände wohl kaum zu umgehen und Kurzschlufsanker sind dabei ausgeschlossen.

Der Übelstand, dafs hier, wo es sich doch meistens um sehr grofse Motoren handelt, bürstenlose Maschinen nicht verwendet werden können, fällt aber nicht arg ins Gewicht, denn einmal im Gange, werden solche Motoren wohl einem verschieden belasteten, aber keinem intermittierenden Betriebe ausgesetzt sein.

Soll der Motor jedoch belastet angehen, dann kann man auch Kurzschlufsanker verwenden und kann dieser auch gleichzeitig mit der Dynamo anlaufen. Man hat nur darauf zu sehen, dafs die letztere gleich beim Beginne der Funktion normal erregt ist.

Bleisicherungen, besonders aber Blitzschutz-Vorrichtungen sind bei solchen Anlagen immer in genügender Zahl anzubringen.

Die Fig. 251 zeigt uns ebenfalls das Schema einer Schaltung zu einer Kraftübertragung auf weitere Entfernungen nach dem zweiphasigen Drehstromsysteme.

G ist die Drehstrom-Dynamo, von der die zwei Doppelleitungen ausgehen, welche vor allem durch die Bleisicherungen *S* geschützt sind.

Man ist für diesen Fall, wie schon einmal erwähnt worden ist, davon abgekommen, Dynamo für hohe Spannungen zu bauen, bei welchen die Gefahr des Funkendurchschlagens eminent ist; man erzeugt vielmehr in der Maschine die sicheren, niederen Spannungen und transformiert dieselben am Orte der Stromerzeugung auf die gewünschte Höhe — der dabei auftretende Kraftverlust von ca. 4% ist wegen der übrigen gebotenen Vorteile leicht zu tragen.

Solche Transformatoren (von nieder auf hoch) sind im Schema durch *R T* angedeutet. Nun können die vier Leitungen dünn (d. i. auch billig) sein, zum Transport von wenig Strom mit hoher Spannung reichen sie aus.

Am Orte der Ausnutzung des Stromes werden die hochgespannten Leitungsströme vor allem durch Transformatoren *L T* (hoch auf nieder) auf die nötige Betriebsspannung gebracht

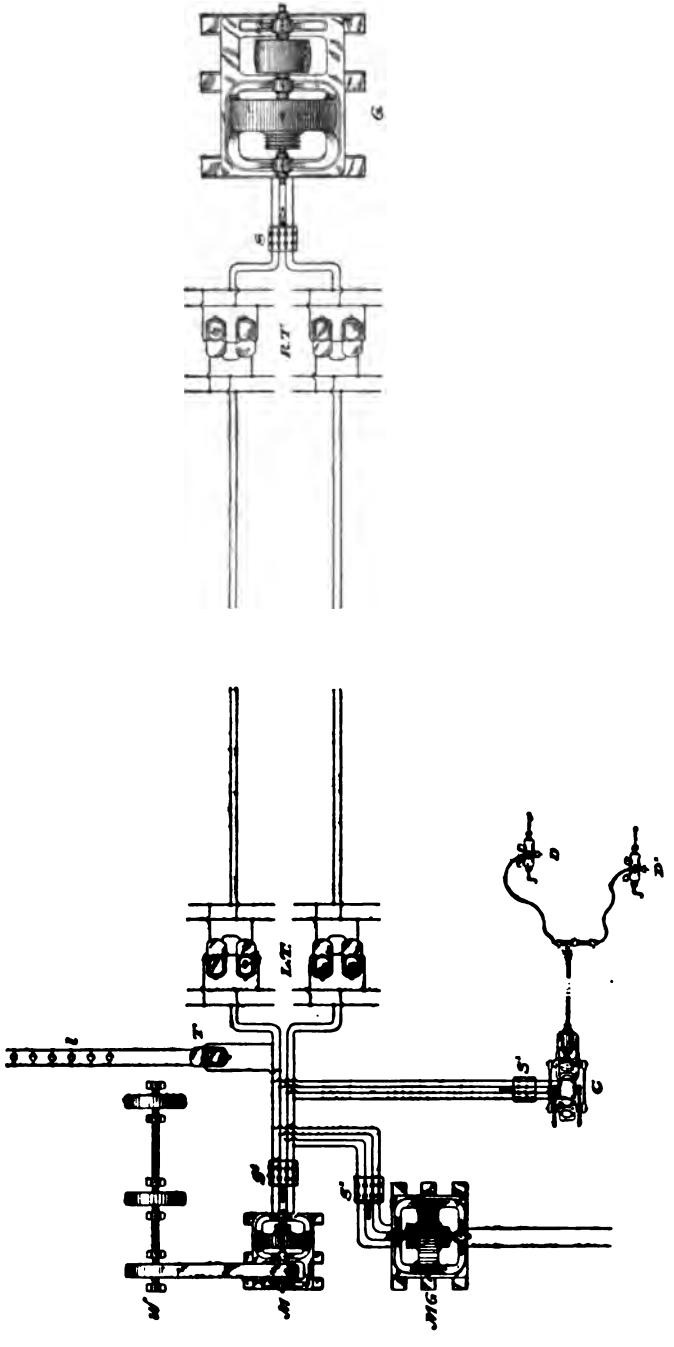


Fig. 251.

und wird diese nun zur Kraftübertragung, zum Lichtbetriebe mit Wechselstrom und durch einen Rotations-Transformator *MG* auch zur Erzeugung von Gleichstrom ausgenutzt.

Diese Rotations-Transformatoren sind eine von der Westinghouse Comp. gern gebaute und angewendete Type. Man erreicht mittels derselben allerdings aus Wechselstrom konstanten Gleichstrom und man kann dann Eisenbahnen betreiben und Akkumulatoren laden; über den Wirkungsgrad solcher Einrichtungen haben wir zufriedenstellende Mitteilungen noch nicht erhalten.

Die A. E.-G. hat eine Drehstrom-Kraftverteilungsanlage in der Breitenburger Portland-Zementfabrik Lägerdorf eingerichtet, welche wegen der verschiedenen Ausnutzung der Motoren als ganz besonders interessant bezeichnet werden kann.

Zur Aufstellung gelangten dort:

2 Motoren DR_{200} modifiziert von 30 PS normaler und 50 PS maximaler Leistung zum Antriebe von zwei grofsen Ziegelpressen mit vertikalem Zylinder,
1 Motor DR_{150} von 15 PS normaler Leistung zum Antriebe einer kleinen Ziegelpresse mit horizontalem Zylinder,
1 Motor DR_{100} von 10 PS normaler Leistung zum Antriebe eines Ofen-Fahrstuhles,
2 Motoren DR_{80} von je 8 PS normaler Leistung zum Antriebe von zwei Ziegelei-Fahrstühlen,
1 Motor DR_{80} zum Antriebe einer Zentrifugalpumpe für die Entwässerung der Kreidegrube,
2 Motoren DR_{50} von je 5 bis 6 PS normaler Leistung zum Antriebe von je zwei Darrenventilatoren,
1 Motor DR_{50} zum Antriebe einer Schlammpumpe,
1 Motor DR_{50} zum Antriebe eines Walzwerkes für die Ziegelei,
2 Drehstrom-Primärmaschinen, Modell DM_{80} von je 72000 Watt Gesammtleistung bei Motorenbelastung,
1 Gleichstrom-Erreger-Maschine, Modell NG_{50}, 111 Volt.

Diese elektrische Anlage dient dazu, die frühere Drahtseil-Transmissionsanlage zu ersetzen. Die Betriebsspannung wurde mit Rücksicht auf die grofse Ausdehnung der Fabrik zu 120 Volt Phasenspannung, 200 Volt Spannung zwischen je zwei Haupt-Leitungen angenommen.

Für die Primäranlage wurden zwei Maschinen gewählt anstatt einer grofsen, einerseits der dadurch bedingten gröfseren Betriebssicherheit wegen, andererseits, um die Maschinen auch bei Nacht, wo nur ca. $^1/_3$ der normalen Betriebskraft gebraucht wird, rationell ausnutzen zu können. Das Parallelschalten der beiden Maschinen während des Hauptbetriebes vollzieht sich leicht mit Hilfe von Phasenlampen. (Siehe Seite 334.)

Über den Antrieb der Arbeitsmaschinen ist folgendes zu bemerken: Mit Ausnahme der Ziegelpressen werden sämtliche Maschinen mit Last, d. h. ohne Anwendung von Voll- und Leerscheiben angelassen. Die Inbetriebsetzung der Motoren erfolgt bei den Ventilatoren, Pumpen und dem Walzwerk durch dreipolige Schalthebel, bei den Fahrstühlen durch dreipolige Umschalthebel mit Kohlenkontakten, und zwar ist bei den letzteren die Bremse mit den Kohlenkontakten derart zwangläufig verbunden, dafs sie in beiden Stellungen vor Einsetzen des Hebels selbstthätig abgehoben und beim Herausziehen des Hebels selbstthätig angepreſst wird. Auch für die Ziegelpressen-Motoren war ursprünglich auf Wunsch der Fabrik belasteter Anlauf in Aussicht genommen, doch war der Stromverbrauch derselben beim Anlassen mit gefülltem Zylinder trotz Verwendung von Anlafsinduktoren ein so hoher, dafs die Spannung der Primärmaschinen ganz rapide sank. Infolgedessen wurden nachträglich auf den Pressen noch Leerscheiben angeordnet und die Anlafsinduktoren gegen Flüssigkeits-Anlafswiderstände ausgetauscht. — Die Motoren sind mit Rücksicht auf den in fast allen Räumen vorhandenen Staub in abgedichteten Blechkästen resp. Kammern eingeschlossen, die bei den Fahrstuhl-Motoren, welche sich am meisten erwärmen, durch einen Ventilationskanal mit der freien Luft in Verbindung stehen. — Alle Schalttafeln und Ausschalter befinden sich in verschliefsbaren Kästen, welche nur von den betreffenden Aufsehern geöffnet werden können. Als vorteilhaft zeigte sich bei dem jetzigen elektrischen Antriebe die Benutzung von Strommessern zur Kontrolle der Steifigkeit der von den Ziegelpressen zu verarbeitenden Masse. Während es früher sehr schwer hielt, stets eine gleichmäfsig steife Masse zu erzielen, sind die Schwierigkeiten jetzt behoben, da die Arbeiter, welche der Presse den Schlamm zuführen, nur den Strommesser zu beobachten brauchen, um zu wissen, ob mehr oder weniger Mull zugesetzt werden mufs.

Die Inbetriebsetzung der ganzen definitiven Anlage erfolgte am 10. Oktober, die ersten Motoren laufen seit Mai 1894.

Aus der vorstehenden Beschreibung ist zu entnehmen, welche wesentliche Vorteile das Parallelschalten von Dynamos bietet. Leider ist diese Art der Dynamoverwendung derzeit noch etwas kompliziert. Bei der Parallelschaltung von Wechselstrom-Maschinen wird verlangt:

1. absolut gleiche Polwechselzahl,
2. Strom- und Spannungskurven aus beiden Maschinen müssen sich genau decken,
3. müssen beide Maschinen gleich viele Pole haben.

Am einfachsten gestaltet sich die Parallelschaltung, wenn beide Dynamos mit einer einzigen Antriebs- (Dampf-) Maschine direkt gekuppelt werden können.

Ist das nicht möglich, so wird man zwischen zwei angetriebenen Maschinen eine Klauenkuppelung anbringen und diese einrücken, sobald beide Maschinen gleiche Tourenzahl haben. Ist das erreicht, so ist die Erregung der zweiten Maschine derart zu regeln, dafs auch gleiche Spannungen erzielt werden; die wirkliche Parallelschaltung darf aber erst erfolgen, wenn sich auch die Ankerspulen vollkommen decken, wobei sich zwangsweise Deckung empfiehlt. Decken sich die Ankerspulen nicht, so tritt Hintereinanderschaltung und daher Kurzschlufs ein. Wenn nun alle diese Bedingungen erfüllt sind, dann hat man immer noch auf eine gleichmäfsige Belastung beider Maschinen ganz besonders zu achten.

Um das Zusammenfallen der Kurven konstatieren zu können, schaltet man zwischen den Kontaktstücken der Schalthebel Glühlampen (sogenannte Phasenlampen) ein. Dieselben leuchten, wenn sich die Spannungskurven beider Maschinen in gleicher Phase, aber in entgegengesetzter Richtung befinden; sie leuchten nicht, wenn sich die Kurven in der Phase und der Richtung vollkommen decken. Tritt das Aufleuchten und Verlöschen der Lampen in Intervallen von etwa zehn Sekunden ein, so ist für das Zusammenschalten beider Maschinen die nötige Übereinstimmung erreicht und man vollzieht die Kuppelung der beiden Maschinen in einem Momente des Verlöschens der Lampen; der Synchronismus der Phase wird dann durch die gegenseitige Einwirkung beider Maschinen aufrecht erhalten. Die weitere

Kontrolle der Leistung zweier parallel geschalteter Wechselstrom-Dynamos darf aber nicht mittels der Ampèremeter geschehen, weil eine Wechselstrom-Maschine in der Form von „scheinbaren Watt“ Ampère und Volt ohne merklichen Kraftverbrauch leisten kann. Zu einer solchen Kontrolle ist ein sogenannter „Phasometer“ unerläfslich. (Siehe Abt. VIII.)

Soll die zugeschaltete Maschine einen gröfseren Teil der elektrischen Belastung übernehmen, so kann dies nicht, wie bei Gleichstrom durch stärkere Erregung geschehen. Eine solche hätte nur zur Folge, dafs ein (wattloser) Korrektionsstrom auftreten würde, der auf die Feldmagnete schwächend einwirkt und dadurch die stärkere Erregung wieder aufhebt. Dabei würden die Maschinen auch „aufser Tritt“ fallen.

Der gleichmäfsigen Belastung beider Maschinen mufs die gleichmäfsige Kraftzufuhr (von den Dampfmaschinen) entsprechen.

Die Erregungen werden solange reguliert, bis die Phasometer Null oder gleiche Ausschläge zeigen.

Erst wenn gleichmäfsige Belastungen erzielt sind, kann ein gemeinsamer Erregungsregulator zur Änderung der Netzspannung verwendet werden, d. h. wenn eben beide Maschinen gleiche Erregungsverhältnisse haben.

Das Abschalten einer solchen Maschine geschieht umgekehrt durch successives Entlasten der Kraft-(Dampf-)Maschine bis zur Leerlaufarbeit (wobei dann natürlich die andere Maschine belastet wird) und bis die Dynamo kaum nennenswerte elektrische Energie mehr abgiebt. Bei solchem Abschalten wird also zunächst durch Änderung der Erregung die Belastung auf die andere Maschine übernommen, die Kraftzufuhr bis zur Leerlaufarbeit geändert, die Schalthebel gelöst und schliefslich die Kuppelung ausgerückt. Das was hier im allgemeinen vom Parallelschalten der Wechselstrom-Maschinen gesagt wurde, gilt nahezu auch in gleicher Weise bezüglich der zwei-, drei- und mehrphasigen Maschinen und wenn sich dabei die Verhältnisse etwas einfacher gestalten, so ist doch das Arbeiten nach den Diagrammen, wie sie in den Fig. 41 und 42 Seite 74 und 75 dargestellt wurden, die Hauptaufgabe des den Betrieb leitenden Ingenieurs.

Herr H. Görges hielt am 18. Dezember 1894 im elektrotechnischen Verein in Berlin einen Vortrag: „Vergleichende Betrachtungen über die Wirtschaftlichkeit des Einphasen- und des

Mehrphasenstromes“ und kam zu folgenden Resultaten bezw. Schlüssen:

Nachdem die Ankerrückwirkung und Streuung beim Wechselstrome ungefähr doppelt so grofs ist wie beim Drehstrome, so verhalten sich bei gleicher Arbeitsleistung die Ströme wie folgt:

Wechselstrom	1	bezw.	100,
Zweiphasiger Drehstrom .	$1/2$	„	50,
Dreiphasiger Drehstrom .	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	„	57,8.

Die Ankerrückwirkung ist bei gleicher Stromstärke bei Wechselstrom in zwei Spulenpaaren und bei Drehstrom in drei Spulenpaaren vollkommen gleich.

Die Leistungen der verschiedenen Maschinensysteme verhalten sich bei gleicher magnetischer Beanspruchung des Materiales und bei gleichförmiger Wickelung des Drahtes über den ganzen Ring, der keine Polansätze hat, wie

Wechselstrom	66,7,
Zweiphasenstrom	94,5,
Dreiphasenstrom	100,0,

das wäre also gerade so, wie die Umfänge der demselben Kreise eingeschriebenen Polygone von 2, 4 und 6 Seiten.

Bedeutet E die EMK pro Spulenpaar, so ist die Arbeit bei Wechselstrom

$$A_w = 2\,E\,J\cos 30^0 = \sqrt{3}\,E\,J,$$

wenn die beiden Spulenpaare um 120^0 gegeneinander verschoben sind und die Stromstärken bei Hintereinanderschaltung dieselbe Phase haben.

Die Drehstromarbeit aber ist bei derselben magnetischen Beanspruchung

$$A_d = 3\,E\,J$$

und es ist das Verhältnis

$$\frac{A_w}{A_d} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 0{,}578.$$

Erhöht man die Stromstärke soweit, dafs bei Wechselstrom mit zwei Spulenpaaren dieselbe Stromwärme auftritt, wie bei Drehstrom in allen drei Spulenpaaren, dann verhält sich

$$\frac{A_w}{A_d} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707$$

und Herr Görges erklärt dies als das günstigste Verhältnis der Arbeiten bei Wechselstrom. Die Ankerreaktion wird aber bei solcher Belastung in Wechselstrom-Maschinen wesentlich höher (um 5,7%) als bei Drehstrom-Maschinen. Herr Gisbert Kapp macht darauf aufmerksam, dafs sich dieses Verhältnis um weitere 5% zu Gunsten der Drehstrom-Motoren ändert, weil die magnetisierende Wirkung der Feldströme bei letzteren nicht aufser Acht bleiben darf.

Man erhebt gegen den dreiphasigen Drehstrom häufig den Einwand, dafs es nicht möglich sei, in den drei Zweigen bei ungleichmäfsiger Belastung ausreichend gleiche Spannungen zu erhalten.

H. Görges meint, man könne einen solchen Übelstand, wenn er wirklich auftreten sollte, und wenn derselbe nicht schon durch passende Schaltungen behoben ist, durch den Bau von Maschinen mit geringer Ankerreaktion entgegentreten und er führt des weiteren aus, dafs die Ankerreaktion bei gleicher Stromentnahme um so gröfser wird, je mehr die Phase des Stromes gegen die Phase der im Anker vorhandenen EMK verschoben ist[1]). 100 Ampère zum Motorenbetriebe entnommen, veranlassen bei konstanter Erregung einen viel gröfseren Spannungsabfall als die Entnahme von 100 Ampère zum Glühlampenbetriebe; dagegen dienen aber Motoren in dreiphasigen Drehstromanlagen nicht selten als Ausgleicher, wenn ungleiche Belastung der Zweige eingetreten ist, denn solche Motoren entnehmen aus allen drei Leitern Energie und die Möglichkeit des Ausgleiches durch dieselben ist leicht einzusehen.

Übrigens wird dem allen vorgebeugt, wenn man eine Anordnung trifft, wie sie der Herr Baurat Ulbricht für den Dresdener Bahnhof kurzweg angeordnet hat: Es wird dort dreiphasiger Drehstrom verwendet; für die Lampen ist ein besonderes Zweileiternetz gelegt, so dafs die Beleuchtung mit einfachem Wechselstrome erfolgt. Zum Motorenbetriebe wurde ein Dreileiternetz gelegt, das für die Kraftübertragung Drehstrom liefert.

---

[1]) G. Kapp erklärt, dafs die Ankerreaktion von Vorteil ist, weil sie die Maschine im Falle eines Kurzschlusses vor Zerstörung schützt. Es ist die Aufgabe der Konstrukteure, den Kompromiss: „Kleine Ankerreaktion und Betriebs-Regelmäfsigkeit und Sicherheit“ festzustellen.

Der einfache Wechselstrom-Motor ergiebt nach thatsächlich ausgeführten Versuchen etwa 30% weniger Leistung als ein gleich schwerer und gleich teuerer Drehstrom-Motor und dabei ist der Wirkungsgrad des letzteren immer noch um 6% bis 10% höher.

Herr Görges verweist übrigens darauf, dafs es dem Konsumenten doch ganz gleichgültig sein kann, wenn er — wir wollen sagen bei gleichen, auf keinen Fall aber höheren Anschaffungskosten — gutes Licht erhält, ob die Leitung aus zwei oder drei Drähten besteht. Beim Motorenbetriebe ist der Konsument aber insoferne im Vorteile, als er durch den dritten Draht die Anlafsvorrichtung, welche beim Wechselstrom-Motor nötig ist, erspart.

Herr Görges kommt zum Schlusse zu folgenden unbestrittenen Behauptungen:

1. Das Dreiphasenstrom-System ist den übrigen Systemen an Wirtschaftlichkeit überlegen, besonders wenn weite Entfernungen zu überwinden sind,
2. die Regulierung des Drehstromes bietet keine Schwierigkeiten,
3. die Mehrphasenstrom-Motoren sind zur Zeit billiger in der Anschaffung, ökonomischer im Betriebe, bequemer in der Handhabung und geben zu Störungen im Lichte weniger Veranlassung als Wechselstrom-Motoren.

Überblicken wir das bis jetzt Gesagte, so ergeben sich für dreiphasige Drehstromanlagen folgende erwähnenswerte Vorzüge:

1. Die Drehstrom-Dynamos neuerer Konstruktion, und die Drehstrom-Motoren haben keine losen, schleifenden Kontakte, arbeiten also vollkommen funkenlos;
2. da dieselben weder Kollektoren, noch Schleifringe, noch Stromabnehmer (Bürsten), sondern nur feste Klemmen haben, so bedürfen solche Maschinen keiner Regulierung, keiner Bedienung, und die elektrischen und magnetischen Vorgänge bewirken deswegen auch keinen Verschleifs;
3. es sind daher aus elektrischen und magnetischen Wirkungen keine Störungen zu fürchten und
4. werden solche Drehstromeinrichtungen viel länger keiner Reparatur unterliegen, als Gleichstromanlagen.

5. Die Materialausnutzung ist beim dreiphasigen Drehstromsysteme viel günstiger sowohl bei den Maschinen, als auch
6. besonders bei den Leitungen, bei welchen trotz der nötigen drei Drähte immer noch 25% Kupfer erspart werden können. Die Leitungen werden demnach bei diesem Systeme wesentlich billiger, als bei den Zweileitersystemen.
7. Dreiphasenstrom kann ebenso und nach denselben Gesetzen wie einfacher Wechselstrom transformiert werden, was demselben einen hervorragenden Vorzug gegenüber Gleichstrom gewährt.
8. Der Wirkungsgrad dreiphasiger Drehstromanlagen ist gleich dem Wirkungsgrade der Gleichstromanlagen,
9. kann man aus Drehstromanlagen gleichzeitig Licht und Kraft zu mechanischer Arbeit entnehmen. Es ist möglich dabei auch entweder mittels der Erreger-Maschine an der Dynamo, oder mittels eines Wechselstrom-Gleichstromumformers ohne Schwierigkeiten Akkumulatoren zu laden.

VIII. Abteilung.

Über das Messen der Wechselströme.

Die dem Wechselstrome eigentümlichen, zu messenden Gröſsen. — (E_{max}, E_{eff}, $M(E)$ = mittlere elektromotorische Kraft und $M(E^2)$. — Verwendung des Elektrodynameters von Siemens und von Ganz. — Die elektrodynamische Wage von Sir W. Thomson (Lord Kelvin). — Das Voltmeter von Cardew. — Energiemessungen. — Kalorimeter. — Phasenmeter von Dobrowolsky. — Diagramm: Wattstrom, Leitungsstrom, (wattloser oder) Leerstrom, Winkel φ. — Erregerstrom, Ladestrom, Korrektionsstrom. — Die alte und die neue Konstruktion der Dobrowolskyschen Phasenmeter (oder Leerstrommesser). — Disposition einer Wechselstromzentrale. — Das Abstellen einer Dynamo. — Messen der Energie mit einem, mit drei, mit zwei Dynamometern. — Elektrizitätszähler für Drehstromanlagen.

Die beim Messen von Wechselströmen in Betracht kommenden Gröſsen sind ziemlich komplizierter Natur. Wir haben zu unterscheiden:

E_{max} die maximale elektromotorische Kraft,
E_{eff} die effektive „ „
$M(E)$ die mittlere „ „ und
$M(E^2)$ eine elektromotorische Kraft, welche sich aus den Quadraten der Mittelwerte ergiebt.

Die gleichen Beziehungen gelten dann auch in Betracht der Stromstärken.

Unter „mittlerer Stromstärke“ verstehen wir diejenige, welche der betreffende Wechselstrom, als Gleichstrom kommutiert, in den elektrolytischen Äquivalenten ergeben würde. Die vom Dynamometer angezeigte Stromstärke nennen wir die „effektive Stromstärke“. Es bestehen, wie schon an anderer Stelle erörtert worden ist, folgende Beziehungen:

$$E_{eff} = 0{,}707\, E_{max}, \qquad J_{eff} = 0{,}707\, J_{max},$$
$$M(E) = 0{,}9\, E_{eff}, \qquad M(J) = 0{,}9\, J_{eff}.$$

Wir können die einfachen magnetischen Meſsinstrumente, die wir beim Gleichstrome benutzen, beim Wechselstrome nicht verwenden, da die Ablenkung, die ein Stromimpuls im ersten Momente bewirken würde, im nächsten Momente wieder durch den Impuls in entgegengesetzter Richtung, weil sich die Stromrichtung umkehrt, zurückgetrieben würde u. s. f.

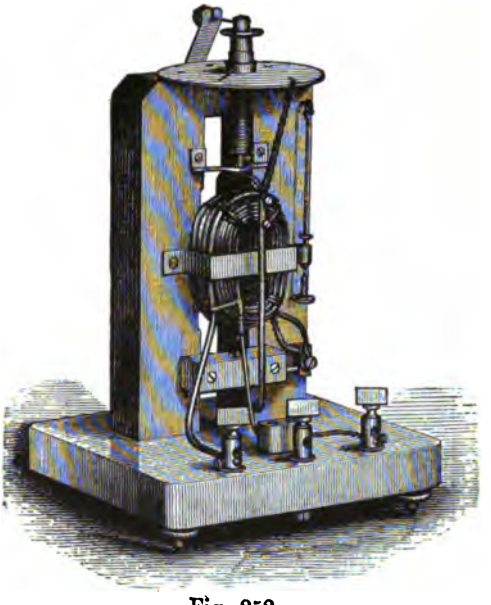


Fig. 252.

Deshalb sind Instrumente anzuwenden, welche von der Stromrichtung unabhängig sind, und als solche empfehlen sich die Elektrodynamometer und diejenigen Apparate, welche auf der Wärmewirkung des Stromes, als einer quadratischen Funktion der Stromstärke beruhen.

Endlich sind für Spannungsmessungen noch die elektrostatischen Wirkungen zu verwenden.

Das Elektrodynamometer, welches zuerst von W. Weber konstruiert wurde, besteht aus einer festen (Fig. 252, 253 und 254, Seite 342) $ABCD$ und einer beweglichen Spule EFG, die beide hintereinander in den Stromkreis geschaltet werden und bei Stromdurchgang dann gemäfs den Gesetzen der Elektrodynamik eine abstofsende Wirkung aufeinander ausüben. In der Nulllage stehen die Windungen aufeinander senkrecht und es ist zu beachten, dafs die bewegliche Spule in die Richtung des magnetischen Meridians gebracht wird, um unabhängig von der Variation des Erdfeldes zu werden. In der Form, die W. Siemens dem

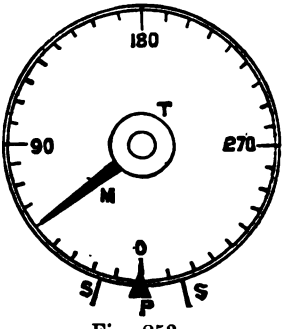


Fig. 253.

Instrument gegeben hat, wird die drehende Wirkung durch eine Torsionsfeder T wieder ausgeglichen, so dafs die Beziehung zwischen der gemessenen Stromstärke $M(J^2)$ und dem Torsionswinkel α besteht:

$$M(J^2) = C \cdot \alpha.$$

Wenn die Ablenkungsspule einen Selbstinduktionskoeffizienten von einiger Gröfse hat, so ist dieser in Rechnung zu ziehen und nach der bekannten Formel $L = \frac{4\pi n^2 s}{l}$ (n ist dabei die Windungszahl, s die Schnittfläche und l die Länge des Kraftflusses) aus den Dimensionen zu bestimmen; meist aber ist er so klein, dafs er für praktische Messungen vernachlässigt werden und das Instrument auch mit Gleichstrom geaicht werden kann. Beim Gebrauch des Instrumentes ist aus naheliegenden Gründen zu beachten, dafs sich keine grofsen Eisenmassen in der Nähe befinden sollen.

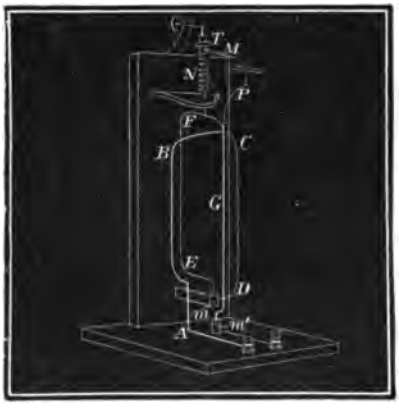


Fig. 254.

Das Prinzip des Dynamometers ist auch bei den elektrodynamischen Wagen zur Anwendung gebracht worden, wie sie in neuerer Zeit, besonders in England, nach den Angaben von Lord Kelvin u. a. angefertigt werden. Da diese Instrumente einen hohen Grad von Genauigkeit erreichen und für Stromstärken über 100 Ampère die einzigen einfachen Apparate zur Strommessung sind, wollen wir sie etwas näher behandeln. Die Elektrodynamometer von Siemensscher Form können nämlich nicht über eine gewisse Stromstärke hinaus gebaut werden, da die Verbindung der beweglichen Spule mit der festen durch Quecksilberkontakte erfolgt, deren Verwendung aber bei den starken Strömen wegen der Verdampfung des giftigen Metalles bald eine Grenze findet.

Die Wage von Lord Kelvin wird in fünf Typen hergestellt, mit denen man ein Mefsbereich von 0,01 bis 2500 Ampère beherrscht und die Anordnung des Instrumentes ist die folgende: Ein be-

weglicher Ring wird von zwei festen (bei dem Typus für die stärksten Ströme von nur einem) Ringen in Bewegung gesetzt; alle drei Ringe liegen horizontal. Der Strom verlauft derart, dafs die beweglichen Ringe in entgegengesetztem Sinne durchlaufen werden, um den Einfluſs des Erdmagnetismus und benachbarter Ströme aufzuheben. Dann wird das eine Ende des beweglichen Ringes von der auf derselben Seite liegenden Gruppe der festen Ringe nach oben, das andere von der anderen nach unten angezogen. Die beweglichen Ringe sind an den beiden Enden eines Wagebalkens angebracht, der mit einem Zeiger über einer Skala spielt und der Arm des Wagebalkens wird von zwei Zapfen getragen, von denen ein elastisches Band aus feinem Drahtgewebe zur Stromüberführung ausgeht. Das Balancieren der Wage bei Stromdurchgang wird durch ein Gleitgewicht erreicht, welches von einem horizontalen festen Arme aus auf den Wagebalken transportiert werden kann, sowie durch ein am Ende des einen Wagearmes anzuhängendes Gegengewicht. Will man einen Strom messen, so bewegt man das Gleitgewicht so lange, bis die Wage auf Null einspielt und man kann dann noch an einer hinter dem Balken befindlichen Schätzungsskala den für die meisten technischen Messungen hinreichend genauen Wert ablesen. Jede Zahl an der Schätzungsskala stellt die doppelte Quadratwurzel des entsprechenden Wertes der feinen Teilung auf dem Wagebalken dar.

Diese Wagen haben für die hohen Stromstärken nur den Übelstand, dafs sie für die relativ beträchtliche schwingende Masse eine grofse Schwingungsdauer, bis zu einer halben Minute, besitzen und es ist also Bedingung, dafs die zu messenden Ströme einigermaafsen konstant sind. Abhilfe gegen diesen Übelstand wird durch die sogenannte Einstellungswage (London, Board of Trade) versucht. Diese Wagen sind aber zur Zeit die einzigen Instrumente, mit denen man starke Wechselströme direkt messen kann. (Die eingehendere Beschreibung dieser Wage, wie sie von der Firma James White in Glasgow fabriziert wird, findet man in Kittlers „Handbuch“, II. Auflage, Seite 240.)

Unter den Instrumenten, welche die kalorischen Wirkungen des Stromes zur Messung benutzen, steht das Cardewsche Voltmeter (Fig. 255 und 256, Seite 344 und 345) obenan. Dasselbe ist ausführlich beschrieben in Kittlers „Handbuch“, I. Auflage,

II. Band, I. Hälfte, Seite 151 ff. Dieses Meſsinstrument besteht aus einem feinen Platinsilberdraht, ca. 0,06 mm stark, von beträchtlicher Länge (ca. 2 m), dessen Ausdehnung durch die Wärme direkt mittels einer Achse auf einen Zeiger übertragen wird. Als entgegengestellte Kraft wirkt die einer Spiralfeder. Der Vorteil des Instruments besteht darin, daſs es von der Form der Maschinenkurve und der Wechselzahl unabhängig ist, sowie von benachbarten Strömen nicht beeinfluſst wird, ein Nachteil ist, daſs es relativ viel Strom (ca. $^1/_4$ Ampère), konsumiert. In den unteren Grenzen ist es ferner ziemlich unempfindlich und man hat infolgedessen Konstruktionen angewendet, bei denen man den „Hitzdraht“ in mehrere Teile zerlegt hat, um sie parallel, und, für die höheren Gebiete, hintereinander schalten zu können.

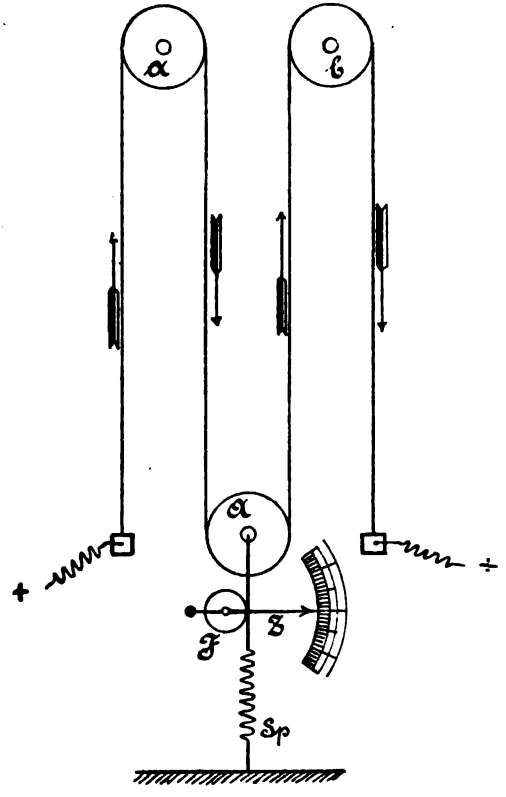


Fig. 255.

Anstatt die direkte Verlängerung des Drahtes durch die Wärme als Maaſs des Stromes und damit der Spannung zu benutzen, haben Ayrton und Perry die Durchbiegung bei der Erwärmung zur Anwendung gebracht und damit eine fast gleichmäſsige Skala erzielt.

Bei dieser Art der Anwendung läſst sich auch eine kompendiöse Form finden, nach der, mittels Verzweigung in einzelnen Strombahnen, das „Hitzdraht-Meſsinstrument“ auch als Ampèremeter zu verwenden ist. Natürlich sind alle Skalen empirisch durch Vergleichung mit einem Normalinstrumente herzustellen.

Erwähnen wollen wir noch, dafs auch die technischen Galvanometer, welche auf der Einziehung von Eisenmassen in eine Spule beruhen, zur Messung von Wechselströmen sich verwenden lassen. Diese Instrumente zeigen aber nur richtig, wenn sie für die

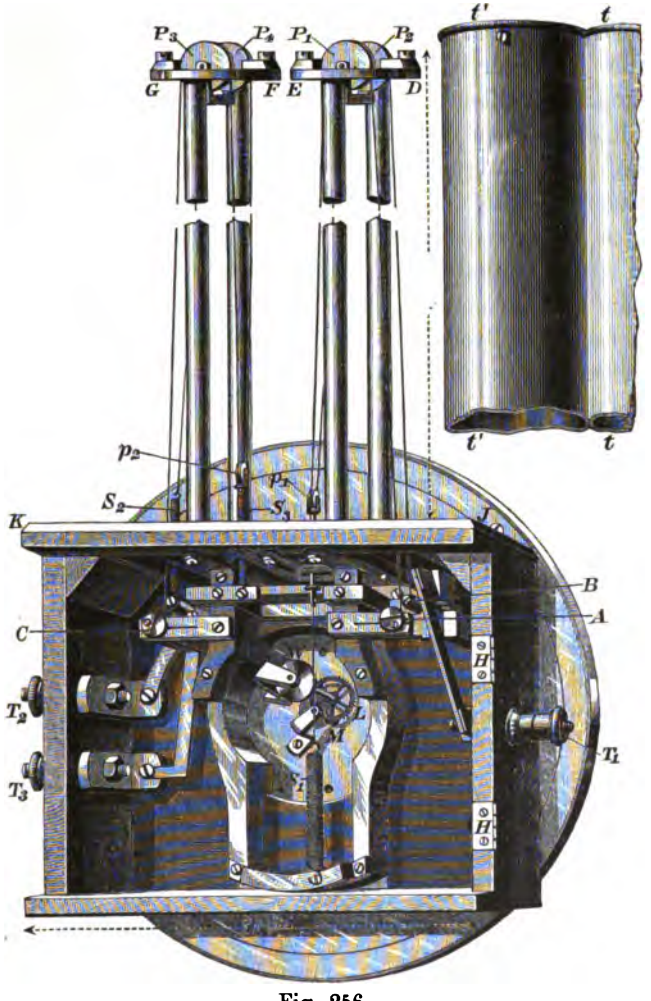


Fig. 256.

Stromkurve und die Wechselzahl, mit der sie geaicht sind, verwendet werden und variieren in dem Maafse in ihren Angaben, als die verwendeten Eisenmassen gröfser werden und die Anzahl der Polwechsel und damit die Selbstinduktion ansteigt.

Die sichersten Apparate zur Messung der Spannung sind die auf den statischen Wirkungen beruhenden; sie haben den Vorteil, dafs sie keine Energie verzehren und dafs sie auch unabhängig von Wechselzahl und Stromkurve sind. Dagegen ist ihre Empfindlichkeit für niedere Spannungen mäfsig, so dafs sich Lord Kelvin dadurch geholfen hat, für die technischen Instrumente die gesteigerte Wirkung durch Oberflächenvergröfserung der wirkenden Teile zu erreichen, dafs er viele Blättchen des festen mit dem einen Potentiale geladenen Teiles auf den beweglichen Teil, der auch grofse Oberfläche und das andere Potential hat, einwirken läfst. Allerdings kann hier auch erst von etwa 50 Volt an gut gemessen werden.

Von ganz besonderer Wichtigkeit sind nun beim Wechselstrome die Energiemessungen. Wir sahen, dafs die Energie sich darstellt aus dem Produkte der effektiven Spannung in die effektive Stromstärke in den Cosinus des Phasen-Verschiebungswinkels und es geht daraus hervor, dafs die Energiemessung keine einfache Sache mehr ist. Für dieselbe stehen zwei Hilfsmittel zur Verfügung, einmal die nach dem elektrodynamischen Prinzipe konstruierten Wattmeter, wie sie von der Firma Ganz & Co. hergestellt werden und dann die Kalorimeter. Für den Drehstrom hat schon Ferraris im Prinzip ein Instrument angegeben, welches erlaubt, den Phasen-Verschiebungswinkel zu bestimmen. Dieses Instrument hat Herr v. Dolivo-Dobrowolsky in seinem Phasenmesser ausgebildet und mit Hilfe desselben kann man also bei gleichzeitiger Ablesung eines Spannungs- und Strommessers die Energie durch Multiplikation der drei Ablesungswerte erhalten.

Das Ganzsche Wattmeter ist folgendermaafsen konstruiert: Das Instrument besteht zunächst aus einem Elektrodynamometer mit Torsionsfeder und einem Paar fester Spulen für stärkere und schwächere Ströme. Der Hauptstrom passiert das Instrument. Die bewegliche Spule hat wenige Windungen und steht mit einem „Arbeitsdrahte“ in konstanter Verbindung. Den Nebenstrom kann man kommutieren, um von der nicht genauen Zentrierung unabhängig zu sein. Das Instrument wird mittels Gleichstrom geaicht, da die in ihm zur Verwendung kommenden Widerstände nur geringe Selbstinduktion besitzen; die Angabe erfolgt in Watt; die Ablesung ist direkt das Produkt aus einer Konstanten in den Torsionswinkel (Mittel von rechts

und links) und dem bei der Messung verwendeten Widerstande des Arbeitsdrahtes.

Der am sorgfältigsten zu behandelnde und die meisten Korrektionen benötigende Apparat zur Messung der Energie eines Wechselstromes ist das Kalorimeter, in welchem die Stromwärme an eine Flüssigkeit abgegeben wird, deren Temperaturerhöhung das Maafs abgiebt.

Da das Instrument, wie schon gesagt, sehr diffizil zu behandeln ist und nur in seltenen Fällen zur Verwendung gelangt, erwähnen wir es nur, ohne weiter darauf einzugehen.

Phasenmeter. v. Dobrowolsky verweist in einem am 22. Mai 1894 in Berlin (E. T. V.) gehaltenen Vortrage darauf, dafs in die gesamte Wechselstromtechnik der Phasenunterschied den bestimmenden Faktor bildet, und beschreibt ein Instrument

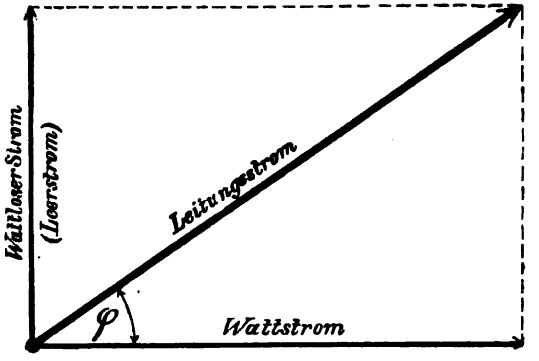


Fig. 257.

zur Bestimmung von Phasenunterschieden beim Wechselstrome, wobei er folgende instruktive Einleitung voraussendet:

„Erst die klare Vorstellung über die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ermöglichte die rationelle, einfache Berechnung von Motoren, Transformatoren, Drosselspulen u. s. w. Immer mehr Verbreitung findet in technischen Kreisen die Methode der Zerlegung des Wechselstromes in Wattstrom und eine oder zwei wattlose Komponenten: das rechtwinkelige Diagramm (Fig. 257) kommt immer mehr in Gebrauch, auch bei den kompliziertesten Fällen.

Der resultierende oder der Leitungsstrom kann direkt mittels Ampèremeter (Elektrodynamometer) abgelesen werden; der Watt-

strom kann durch Division der mittels eines Wattmeters abgelesenen Watt durch die effektive Voltzahl leicht gefunden werden; bei gegebener Voltzahl kann diese letzte eventuell mit in die Konstante oder in die Graduierung des Wattmessers aufgenommen werden, so dafs der Wert des Wattstromes auch direkt abgelesen werden kann. Aus dem Verhältnisse des Wattstromes zum Leitungsstrom folgt cos φ und mithin die Phasenverschiebung als solche; weiterhin kann man hieraus den wattlosen Strom graphisch oder rechnerisch ermitteln.

Wenngleich diese Methode sehr einfach ist, so müfste man sie doch für allgemeineren Gebrauch noch elementarer fassen. Es sollen hier einige Fälle angeführt werden, wo nur eine direkte Ablesung der wattlosen Stromkomponente Wert hat, und wo weder Zeit noch Möglichkeit ist, diese auch nur mit dem Rechenschieber zu suchen, geschweige denn graphisch zu konstruieren. Erst wenn es möglich gemacht ist, mit der wattlosen Komponente direkt zu arbeiten, wird das rechtwinkelige Diagramm zu voller Geltung kommen und sich des verdienten weitgehendsten Gebrauches erfreuen können.

Es ist zweifellos, dafs das neue Instrument — wenngleich es vorläufig noch nicht vollkommen und mancher zukünftigen Verbesserung fähig ist —, ein Wechselstrom-Mefsinstrument von grofser Bedeutung werden dürfte.

Ein solcher Apparat dient, trotz seiner Bezeichnung als Phasen-Mefsinstrument, hierzu meist nur indirekt, er ist vielmehr nur ein Ampèremeter für die wattlose Stromkomponente. Diese letzte wird im englischen meist als „idle current“ bezeichnet. In Ermangelung eines besseren deutschen Wortes dürfte „Leerstrom“ die geeignetste Abkürzung für wattlose Stromkomponente sein und es würde dann das Instrument Leerstrommesser (idle-current-meter) heifsen können.

Hier dürften auch einige Worte zur Begründung des neuen Ausdruckes „Leerstrom“ nötig sein. Bei leerlaufenden Wechselstrom-Motoren, unbelasteten Transformatoren, unbelasteten Hochspannungsleitungen u. s. w. ist die „Leerlauf-Stromstärke“ nahezu gleich der wattlosen Stromkomponente des Leitungsstromes, da der Winkel φ grofs und cos φ klein ist. Die Stromstärke des Leerlaufes oder der Leerlaufstrom ist nur unwesentlich gröfser, als die wattlose Komponente: bei Motoren z. B. in der Haupt-

sache um den rechtwinkelig hinzuaddierten Betrag an Wattstrom für Luft- und Lagerreibungen (für das „Laufen"). Der „Leerstrom" wäre gleich dem „Leerlaufstrome", wenn das „Laufen" keine Arbeit konsumieren würde oder nicht zu berücksichtigen wäre. Die Bezeichnung „Erregerstrom" für den „idle-current" ist auf elektromagnetische Apparate beschränkt und enthält also z. B. nicht den „Ladestrom" einer leeren (unbelasteten) Hochspannungsleitung. „Erreger-" und „Ladestrom", ebenso wie der wattlose „Ausgleichs- oder Korrektionsstrom" zwischen zwei parallel geschalteten Wechselstrom-Dynamos sind Spezialfälle von Leerstrom. Man könnte bei Serienschaltung von Apparaten auch die Betriebsspannung in Wattspannung und Leerspannung zerlegen, so z. B. im Falle wo „Drosselspulen" den Bogenlampen vorgeschaltet werden. Wird ferner z. B. ein Elektromagnet mit einem entsprechend dimensionierten Kondensator hintereinander geschaltet, so heben sich die „Drossel-" und „Ladespannung" auf, die Leerspannung der Kombination ist gleich Null, somit ist auch keine wattlose Komponente, keine Phasenverschiebung vorhanden. Je nachdem der Leerstrom die Stromphase vor oder hinter die Klemmenspannungsphase verschiebt, könnte man ihn mit + oder — Zeichen versehen, somit den „Erregerstrom" als negativen, den „Ladestrom" als positiven Leerstrom bezeichnen; der „Korrektionsstrom" bei parallel laufenden Wechselstrom-Maschinen ist bald positiv, bald negativ, je nachdem die an die Sammelschienen angeschlossene Maschine im Verhältnisse zur jeweiligen Kraftzufuhr zu schwach oder zu stark erregt ist. Desgleichen kann auch die Leerspannung eines Systemes ihr Vorzeichen wechseln, je nachdem durch Überwiegen der „Drosselspannung" (Selbstinduktion) oder der „Ladespannung" (Kapazität) eine Voreilung oder ein Zurückbleiben der Spannungsphase in Bezug auf die des Stromes eintritt. Mit Hilfe des vorliegenden Instrumentes wird man nicht nur die Gröfse des Leerstromes bezw. der Leerspannung bestimmen können, sondern auch dessen Vorzeichen."

Bevor wir nun die Beschreibung des neuen Phasenmeters der A. E.-G. nach dem Vortrage des v. Dobrowolsky fortsetzen, erscheint es bei der Wichtigkeit dieses Instruments nötig, zu betrachten, nach welchen Grundprinzipien die älteren Instrumente zu diesem Zwecke konstruiert und gebaut wurden.

Wie bei den Experimenten des Ferraris gezeigt worden ist,

gerät ein metallischer Körper (S in Fig. 258), wenn er sich im magnetischen Felde von zwei Wechselströmen ($A_1 A_2$ und $B_1 B_2$) befindet, in Drehung, wenn zwischen den beiden Strömen ein Phasenunterschied herrscht. Derselbe Grundsatz ist einer Meſsvorrichtung zu Grunde gelegt worden, um zwischen zwei Wechselströmen von gleicher Wechselzahl einen etwa vorhandenen Phasenabstand zu entdecken oder auch zu messen. Verhindert man nämlich die Drehung des Körpers S, indem man demselben eine Gegenkraft bietet (in Form eines aufzuhebenden Gewichtes oder einer sich aufwindenden Feder oder dergleichen), so kann durch die Gröſse und Richtung der dazu aufgewendeten Gegenkraft die Gröſse des Drehmomentes bestimmt werden, welches von den beiden Strömen erzeugt wird. Dieses auf den Körper S ausgeübte Drehmoment hängt bei gegebener Wechselzahl von dem Winkel der beiden magnetischen Felder, von der Stärke der beiden Ströme und von dem Phasenabstande der letzteren ab. Die Stellung der magnetischen Felder zu einander hat insofern einen Einfluſs auf das Drehmoment, als dasselbe unter sonst gleichen Verhältnissen sein Maximum dann erhält, wenn der Winkel der Phasenverschiebung beider Ströme gleich dem Winkel der magnetischen Felder (Spulen) wird. Die Fig. 259 zeigt die Anordnung eines darnach gebauten Phasenmessers. Eine Metallscheibe S ist drehbar auf eine Achse aufgesetzt; diese Scheibe besitzt einen oder zwei über der Teilung T spielende Zeiger Z. Eine Feder F verhindert eine beständige Drehung dieser Scheibe. Zwei Spulenpaare aa und bb umgeben die Scheibe. Leitet man durch die Klemmen $A_1 A_2$ einen Wechselstrom und durch $B_1 B_2$ einen zweiten von gleicher Wechsel-

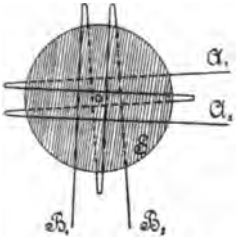


Fig. 258.

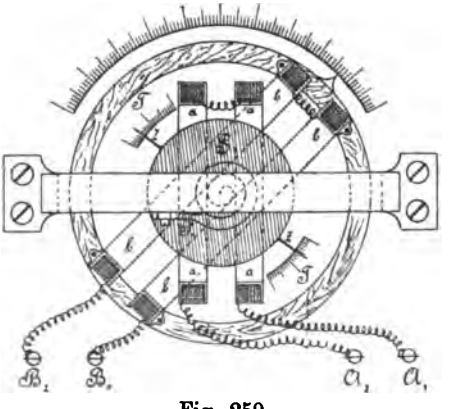


Fig. 259.

zahl, jedoch anderer Phase, so erhält die Scheibe S einen Antrieb nach rechts oder nach links, je nachdem der eine oder der andere der beiden Ströme der voreilende oder der zurückbleibende ist. Der Ausschlag des Zeigers giebt dann ein Maafs für das ausgeübte Drehmoment. Um unabhängig von der Stärke der Ströme zu werden, verdreht man das eine Spulenpaar, z. B. bb, so weit, bis der gröfste Ausschlag an der Skala T erreicht ist; der Winkel, den in diesem Augenblicke die Spulen aa und bb zu einander haben, ist dann gleich dem Winkel der gegenseitigen Phasenverschiebung der Ströme. Man liest diesen Winkel an der zweiten Skala T ab. In vielen Fällen wird es überflüssig sein, diese Verdrehung der Spulen auszuführen, entweder weil man immer mit den gleichen Stromstärken zu thun hat, oder weil es überhaupt nur darauf ankommt, festzustellen, ob eine Phasenverschiebung und nach welcher Richtung hin vorhanden ist. Dann kann die Vorrichtung insofern vereinfacht werden, als man die beiden Spulengruppen fest anordnet und sich mit der Ablesung der Skala T begnügt (Fig. 260).

Selbstredend kann zur Verstärkung der Wirkung Eisen in die Vorrichtung eingefügt und die Anordnung so getroffen werden,

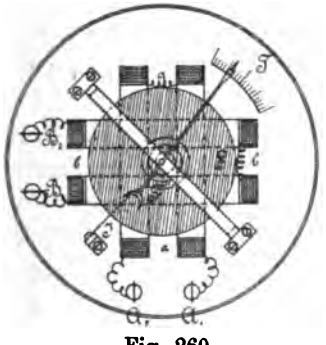


Fig. 260.

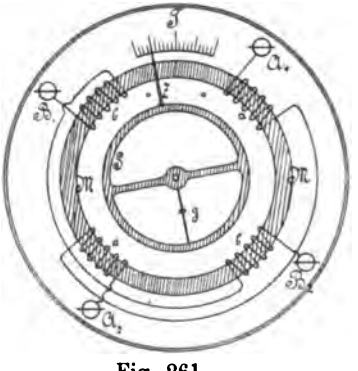


Fig. 261.

wie z. B. auf Fig. 261, 262 oder 263. In Fig. 261 sind die beiden Spulengruppen aa und bb auf einen eisernen Ring M gewickelt und senkrecht zu einander angeordnet (ähnlich wie beim Tesla-Motor). Im Innern dieses Ringes befindet sich ein Ring S aus Eisen oder anderem Metall, welcher sich in Drehung versetzen könnte, soweit nicht ein Gewicht g dem entgegenwirkt. Statt

des Gewichtes oder der Feder kann auch die magnetische Anziehung als Gegenkraft benutzt werden. So ist in Fig. 262 an der drehbaren Scheibe S ein Stück Eisen V befestigt, und ein ihm nahegestellter Stahlmagnet verhindert durch seine Anziehung eine zu grofse Ablenkung der Scheibe. In der Fig. 263 ist der Stahlmagnet durch einen Elektromagneten ersetzt, und zwar

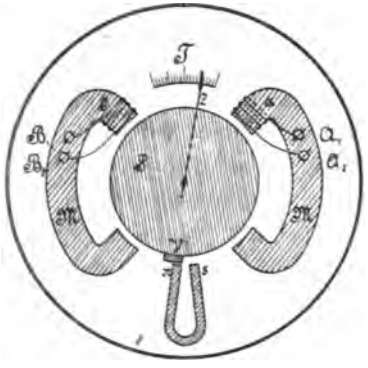


Fig. 262.

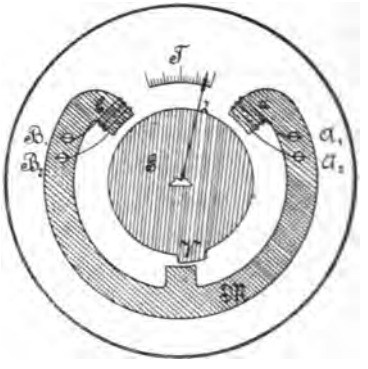


Fig. 263.

wird dieser von eben den beiden Wechselströmen erregt, welche auch die Ablenkung hervorrufen. Letztere Anordnung besitzt hierdurch den Vorzug, die Ablenkungen beinahe unabhängig von den beiden Stromstärken zu erhalten, indem bei schwächeren Strömen auch die Gegenkraft kleiner wird. Auch ist (als Beispiel) die Drehungsachse statt mit Spitzen oder Zapfen hier mit Schneiden versehen gezeichnet. In Fig. 264 ist eine insofern veränderte Ausführungsweise der Vorrichtung angegeben, als der abzulenkende Metallkörper S pendelartig an die Feder F aufgehängt ist und nur einen Teil eines Kreises bildet. Statt des Zeigers ist hier einfach eine Marke Z angebracht.

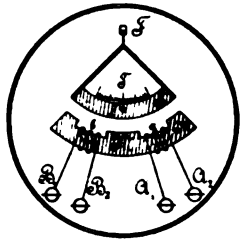


Fig. 264.

Das neuartige Phasenmeter der A. E.-G. beschreibt v. Dobrowolsky im vorerwähnten Vortrage[1]) wie folgt:

„Der Apparat ähnelt in seiner Einrichtung einem Drehstrom-

[1]) E. T. Z. 1894, Heft 25, Seite 350 ff.

Motor. Seine einfachste Einrichtung ist in Fig. 265 und 266 schematisch dargestellt. Zwei senkrecht zu einander gestellte Spulen umgeben eine Eisenscheibe, welche auf Spitzen drehbar angeordnet ist. Sind die zwei Wechselströme, welche die beiden Spulen durchfliefsen, von ungleicher Phase, so wird aus bekannten Gründen ein Drehmoment auf die Scheibe ausgeübt. Dieses Drehmoment hängt bei gegebener Wechselzahl sowohl von dem Produkte der beiden Stromstärken, wie auch vom Sinus des Phasen-Verschiebungswinkels zwischen beiden Strömen ab

$$D = a \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Damit die Scheibe nicht in Rotation gerät, kann der Drehung z. B. eine Spiralfeder entgegenwirken; dann ist die Gröfse der

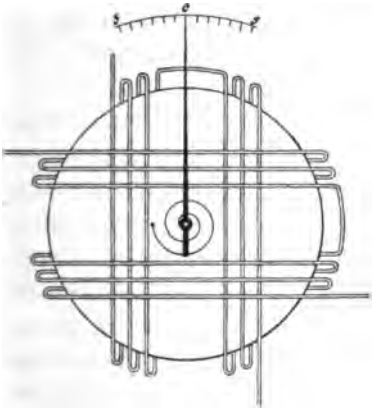


Fig. 265.

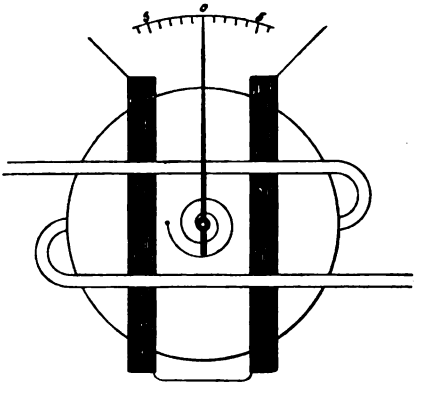


Fig. 266.

Ablenkung der Scheibe aus der Ruhelage ein Maafs für das Drehmoment, mithin auch für die Gröfse der Phasenverschiebung.

Wickelt man eine der Spulen für Spannungsmessung, d. h. mit relativ vielen Windungen aus dünnem Drahte und schaltet man derselben einen gröfseren Betrag von induktionsfreiem Widerstande vor, so hat der Strom in dieser „Voltspule" ziemlich genau die Phase der Spannung. Wird dann durch die andere Spule, welche dickere Windungen hat (Ampèrespule, Fig. 266) der unverzweigte Hauptstrom geleitet, so kann man aus dem Ausschlage der Scheibe auf eventuelle Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung schliefsen

$$D = a \cdot i \cdot e \cdot \sin \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Je nach dem Vor- oder Nacheilen des Stromes gegen die Spannung wird die Scheibe nach der einen oder anderen Seite abgelenkt.

Wird das Instrument immer für dieselbe Spannung benutzt (z. B. für 100 Volt) oder wird bei gewissen Abweichungen der Spannung von dieser normalen der Zusatzwiderstand der Voltspule entsprechend geändert, so verwandelt sich die oben angegebene Formel (2) für das Drehmoment in

$$D = b \cdot i \cdot \sin\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

. Ein Blick auf die Fig. 257, Seite 347, zeigt uns aber sofort, dafs, wenn i der in der Leitung fliefsende Strom ist, $i \cdot \sin\varphi$ gleich ist der wattlosen Komponente dieses Stromes, d. h. dem Leerstrome:

$$D = b \cdot \text{Leerstrom} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Mit anderen Worten: Das Drehmoment, welches auf die Scheibe bei gegebener Spannung und Wechselzahl ausgeübt wird, ist direkt proportional dem Leerstrome.

Die Scheibe wird natürlich mit einem über einer Skala spielenden Zeiger versehen, so dafs die Gröfse des Drehmomentes, mithin auch die des Leerstromes direkt abgelesen werden kann.

Bezüglich der Einteilung der Skala ist nochmals zu bemerken, dafs dieselbe direkt die Gröfse des Leerstromes in Ampère angiebt unter der Bedingung der Benutzung des Instrumentes bei derjenigen Spannung und Wechselzahl, für welche es geaicht ist (z. B. 100 Wechsel per Sekunde, 120 Volt). Weicht die Spannung von dieser ab, so ist die Korrektion leicht auszuführen; ein bei 120 Volt geaichtes Instrument zeigt z. B. bei 110 Volt einfach um 10% zu wenig an etc. Die Korrektion auf eine andere Wechselzahl ist ebenso einfach, allerdings nur, wenn es sich um kleine Abweichungen handelt, indem auch hier Proportionalität angenommen werden kann. Da konventionell Wechselzahl und Spannung für gröfsere Anlagen und Versuchsstationen als konstant gelten können, brauchen die angedeuteten Korrektionen gar nicht vorgenommen zu werden, zumal es meistens bei der Bestimmung des Leerstromes auf einige Prozent Fehler nicht ankommt.

Seine wichtigste Anwendung findet das beschriebene Phasometer oder besser der Leerstrommesser bei Zentralstationen mit parallel laufenden Wechsel- bezw. Drehstrom-Maschinen und auch bei Kraftübertragungen mittels synchroner Motoren.

Es dürfte heute nach den epochemachenden Arbeiten von Mordey und Swinburne bereits allgemein bekannt sein, dafs bei Parallelbetrieb von Wechselstrom-Maschinen deren Leistung nur durch die Kraftzufuhr (Dampf, Wasser etc.) geregelt, nicht aber durch Änderung der Erregung beeinflufst werden kann. Eine der jeweiligen Kraftzufuhr nicht genau entsprechende Erregung des Magnetfeldes wird durch einen wattlosen Ausgleichsstrom mit spezifischer Rückwirkung des Ankers auf das Feld selbstthätig korrigiert. Je nachdem diese wattlose Korrektionskomponente des Stromes in ihrer Phase vor oder hinter der EMK bleibt, wird das magnetische Feld vom Ankerstrome verstärkt oder geschwächt, und so eine falsche Erregung unschädlich gemacht. Dieser Korrektionsstrom ist dasjenige, was man früher die synchronisierende Kraft der Maschinen nannte, er verhindert das „Aufsertrittfallen" der zusammengeschalteten Wechselstrom-Dynamos.

Das Auftreten dieses wattlosen Stromes ist jedoch meistens lästig, denn erstens verhindert er den Überblick über die wahre Belastungsverteilung zwischen den einzelnen Maschinen, macht bei gröfserer Maschinenzahl den Schaltbrettwärter gewissermafsen unsicher, zweitens belastet er die Ankerdrähte der Dynamos, welche mit viel mehr Nutzen Strom auf das Netz geben sollten. Bei weniger guten Wechselstrom-Maschinen kann sogar bei Überbeanspruchung der synchronisierenden Kraft, d. h. bei im Verhältnisse zur Kraftzufuhr zu unrichtiger Erregung die Maschine entweder verbrennen oder aufser Tritt führen.

Nun hat man im beschriebenen Instrumente (Phasometer) ein Mittel, um zu erkennen, ob eine Korrektionskomponente in dem von der Maschine gelieferten Strome vorhanden, nach welcher Seite sie gerichtet ist (+ oder —) und wie grofs sie ungefähr ist; danach kann man der Maschine rechtzeitig helfen durch Änderung ihrer Erregung im Verhältnisse zu der anderen. Ist keine durch den äufseren Stromkreis veranlafste Phasenverschiebung vorhanden, so müssen die Phasometer der Wechselstromzentrale ungefähr auf Null zeigen oder um den Nullpunkt pendeln. Ist im Leitungsnetze eine Verschiebung der Stromphase vorhanden (z. B. wenn Motoren angeschlossen sind), so soll man die Erregungen der Dynamos gegenseitig so stellen, dafs alle Phasometer nach gleicher Richtung und ungefähr gleichviel aus-

schlagen, denn nur dann ist der normale Zustand, d. h. kein Korrektionsstrom da.

Bei Benutzung von Phasometern ist es daher möglich, die Wechselstromzentrale voll auszunutzen, die Maschinen beim Ausschalten auf Nullstrom zu bringen, somit jegliche Schwankung des Lichtes zu vermeiden, und aus der Summe der Ampèremeter-Ablesungen bei den einzelnen Maschinen über den Stromverbrauch im Leitungsnetze zu urteilen.

Die Fig. 267 zeigt schematisch die Disposition und Schaltung einer Wechselstromzentrale bei Benutzung der Phasometer (Leerstrommesser). M, M ... sind einzelne Wechselstrom-Maschinen,

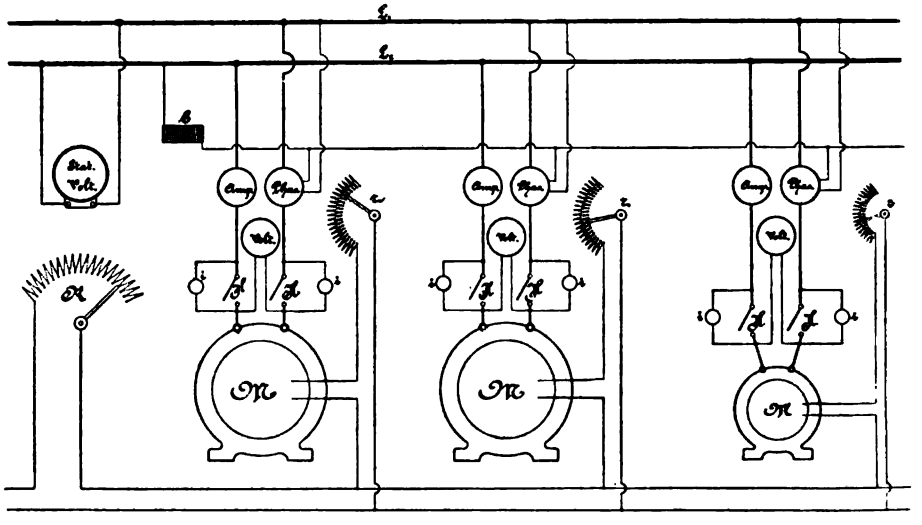


Fig. 267.

welche auf die gemeinsamen Leitungen oder Stationssammelschienen L_1 und L_2 geschaltet werden. In die Zuleitungen der Maschinen zu den genannten Sammelschienen sind die Hauptstromausschalter H, H ... und bei jedem dieser letzten als Indikator für Synchronismus in bekannter Weise die sogenannten „Phasenlampen“ i, i ... geschaltet. Ferner enthält jede Maschinenleitung je ein Ampèremeter und je ein Phasometer. Die Ampèremeter können zweckmäfsig auch durch Wattmeter ersetzt werden. Die Phasometer oder Leerstromanzeiger sind mit ihrer Ampèrespule in die Maschinenleitung eingeschaltet, während ihre Voltspulen von den

beiden Leitungen L_1 und L_2 (oder auch von den Klemmen der Dynamos) abgezweigt werden. Man giebt mit Vorteil sämtlichen Phasometern in ihrer Voltleitung eine gemeinsame Vorschaltspule S. Diese letztere kann eventuell, um bei Motorenbelastung der Station die Phasometer auf Null zu bringen, einen einstellbaren Betrag an Selbstinduktion erhalten. Die Maschinen erhalten ferner, wie Fig. 267 zeigt, je ihr Voltmeter und einen Erregungsregulator r, r ... Letzterer ermöglicht erstens, vor der Zuschaltung eine Maschine auf die Schaltbrettspannung zu bringen, und zweitens, nach dem Zuschalten und während des Betriebes die richtige Stellung des Phasometers einhalten zu können. Die am Stationsvoltmeter zu beobachtende Spannung wird am Haupterregungsregulator R reguliert, falls man nicht vorzieht, eine lösbare, bühnenregulatorähnliche Kuppelung der Einzelregulatoren r, r ... einzurichten. Ergiebt sich im Betriebe, dafs bei gleichmäfsigem Stande der Phasometer die eine oder die andere Maschine mehr oder weniger Strom giebt als erwünscht, so kann dann nur durch Änderung der Kraftzufuhr (Beeinflussung der Dampfmaschine oder Turbine) nachgeholfen werden; wozu bei Dampfmaschinen zumeist die Siemenssche Methode der elektrischen Regulierung vom Schaltbrette aus recht bequem und zweckmäfsig ist.

Beim Abstellen einer Dynamo mufs deren Kraftzufuhr erst langsam abgeschnitten werden, wobei gleichzeitig durch Verstellen des zugehörigen Regulators r der Phasometer auf Null gehalten wird, bis der Zeiger des Ampèremeters ganz zurückgegangen ist und nahezu keinen Strom mehr anzeigt; sodann wird Hauptschalthebel H ausgeschaltet und die Maschine vollends abgestellt.

In ähnlicher Weise kann man bei synchronen Motoren die für die jeweilige Belastung günstigste Erregung mittels eines Phasometers leicht finden, hierdurch das Minimum der Stromstärke in der Fernleitung erreichen und somit die Verluste ($r i^2$) im Stromkreise wesentlich vermindern. Wenngleich manchmal bei sehr konstanten und annähernd bekannten Belastungen auch das Regulieren direkt nach dem Minimum der Ampère möglich ist, so treffen diese Bedingungen doch nur selten zu und die Benutzung des Phasometers oder Leerstromanzeigers bietet den Vorteil, dafs man schon vor dem Bewegen der Kurbel des Regulators weifs, in welcher Richtung zu regulieren ist, man

erkennt auch sofort, ob überhaupt ein Nachstellen der Mühe wert ist oder nicht: der Betrieb wird sicherer und die Bedienung einfacher."

Messen kann man die Gesamtarbeit in einer dreiphasigen Drehstromanlage, in welcher die einzelnen Zweige gleich belastet sind, am besten mittels des Dynamometers. Man schaltet die Stromspule des Apparates in eine der Hauptleitungen. Die Spannungsspule legt man mit einer Klemme fest an den entsprechenden Pol, die zweite Klemme ist mit einem Umschalter zu verbinden, welcher gestattet je nach Bedarf vorerst den zweiten Pol, dann den dritten Pol mit diesem Spulenende zu verbinden.

Erfolgt der Ausschlag bei beiden Messungen nach derselben Seite, so ist das ein Zeichen, dafs die eine der Arbeiten negativ gemessen ist und man kann daher die gefundenen zwei Werte addieren.

Man kann aber auch drei Dynamometer anwenden und dieselben Schaltungen bezw. Umschaltungen ausführen. Man erhält dann sechs Arbeitsbeträge: drei positiv, drei negativ. Die Addition dieser Werte ergiebt den dreifachen Betrag der wirklich geleisteten Arbeiten. Auch in diesem Falle müssen die Zeiger der Meßapparate natürlich immer nach derselben Seite hinzeigen. Das wäre nun eine verhältnismäßig einfache Methode und leichte Rechnung. Wenn aber ungleiche Belastung der Zweige und Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung eintritt, dann komplizieren sich die Messungen ganz bedeutend.

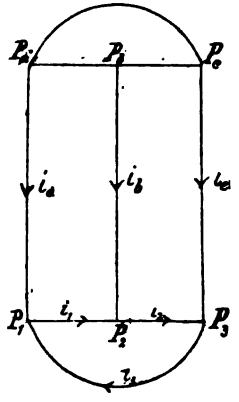


Fig. 268.

Die Messung der Arbeit in einem dreiphasigen Wechselstromsysteme kann entweder durch die Ermittelung zweier (nach Behn-Eschenburg, E. T. Z. 1892, Seite 73) oder dreier Produkte: Strom mal Spannung erfolgen; letztere Methode hat Dr. O. Frölich in der E. T. Z. 1893, Seite 574, beschrieben.

Nach Behn-Eschenburg bedeuten in nebenstehender Fig. 268 i die Stromstärken, P die Potentialwerte und es gelten in diesem Dreiphasensysteme, wie bekannt, die Gleichungen:

$$i_b = i_{21} - i_1,$$
$$i_c = i_3 - i_2,$$
$$i_a + i_b + i_c = 0.$$

Die Arbeit in den äußeren Leitungen ist:

$$A = i_a (P_a - P_1) + i_b (P_b - P_2) + i_c (P_c - P_3) + i_1 (P_1 - P_2) + \\ + i_2 (P_2 - P_3) + i_3 (P_3 - P_1).$$

Setzt man für:

$$i_2 (P_2 - P_3) = - i_2 (P_1 - P_2) - i_2 (P_3 - P_1)$$

und benutzt dann die drei ersten Gleichungen, so ergiebt sich:

$$A = [(P_b - P_a) - (P_1 - P_2) - (P_a - P_1)]\, i_b + [(P_c - P_a) + \\ + (P_3 - P_1) - (P_a - P_1)]\, i_c = (P_b - P_a)\, i_b + (P_c - P_a)\, i_c.$$

Behn-Eschenburg giebt folgendes Beispiel:

Ist
$$P_b - P_a = E_a \sin (2 \pi n t + \alpha_1),$$
$$i_b = J_b \sin (2 \pi n t + \alpha_2),$$
$$P_c - P_a = E_c \sin (2 \pi n t + \beta_1),$$
$$i_c = J_c \sin (2 \pi n t + \beta_2),$$

und bildet man das Integral

$$n \int_0^{\frac{1}{n}} A \, dt,$$

so erhält man für die Arbeit in der Zeiteinheit, welche mit zwei Dynamometern gemessen werden kann:

$$A_d = \frac{E_a J_b}{2} \cos (\alpha_1 - \alpha_2) + \frac{E_c J_c}{2} \cos (\beta_1 - \beta_2).$$

Dr. O. Frölich erstreckt solche Messungen auf drei derartige Produkte:

Bedeuten in Fig. 269 A, B, C die Ströme in den Zuleitungen zu der Verbrauchsstelle, P_1, P_2, P_3 die absoluten Spannungen,

$$\Delta_{12} = P_1 - P_2,$$
$$\Delta_{23} = P_2 - P_3,$$
$$\Delta_{31} = P_3 - P_1$$

die Spannungsdifferenzen,

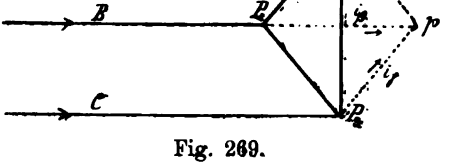


Fig. 269.

dann ist, nach einer von Görges (E. T. Z. 1891, Seite 215) aufgestellten Form, die Arbeit

$$K = \tfrac{1}{3} A (\Delta_{12} - \Delta_{31}) + \tfrac{1}{3} B (\Delta_{23} - \Delta_{12}) + \tfrac{1}{3} C (\Delta_{31} - \Delta_{23}),$$

nun ist aber $A + B + C = \emptyset$ und $\Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{31} = \emptyset$, man erhält also z. B.

$K = \frac{1}{3} A(\Delta_{12} - \Delta_{31}) + \frac{1}{3} B(\Delta_{23} - \Delta_{12}) - \frac{1}{3}(A+B)(\Delta_{31} - \Delta_{23})$ oder

$K = \frac{1}{3} A(\Delta_{12} + \Delta_{23} - 2\Delta_{31}) + \frac{1}{3} B(2\Delta_{23} - \Delta_{12} - \Delta_{31})$

$= -A\Delta_{31} + B\Delta_{23}$,

oder $K = A(P_1 - P_3) + B(P_2 - P_3)$

und ähnlich $= B(P_2 - P_1) + C(P_3 - P_1)$,

$= C(P_3 - P_2) + A(P_1 - P_2)$.

O. Frölich giebt noch eine weitere Formel, für den Fall, dafs von jeder der drei Leitungen nach einem isolierten Punkte p eine Verbindung hergestellt wird, deren Widerstand gleich w ist. Man hat alsdann:

$$i_\alpha + i_\beta + i_\gamma = \emptyset,$$
$$\Delta_{12} = P_1 - P_2 = (i_\alpha - i_\beta)\, w,$$
$$\Delta_{23} = P_2 - P_3 = (i_\beta - i_\gamma)\, w,$$
$$\Delta_{31} = P_3 - P_1 = (i_\gamma - i_\alpha)\, w,$$

und erhält mit Beziehung auf den obigen ersten Wert von K

$$\frac{K}{w} = \tfrac{1}{3} A(2 i_\alpha - i_\beta - i_\gamma) + \tfrac{1}{3} B(2 i_\beta - i_\gamma - i_\alpha) + \tfrac{1}{3} C(2 i_\gamma - i_\alpha - i_\beta)$$

oder, da $\Sigma i = \emptyset$:

$$\frac{K}{w} = A\, i_\alpha + B\, i_\beta + C\, i_\gamma.$$

Man kann hiernach die Arbeit in einem Dreiphasenstromsysteme messen, wenn man in jede Leitung ein Dynamometer einschaltet; der Ausschlag jedes einzelnen dieser Energiemesser ist dann für die betreffende Leitung charakteristisch.

Es ist aber auch möglich, das Messen der Energie im Dreiphasensysteme mit zwei Dynamometern recht einfach zu bewirken.

Wenn bei dreiphasigen Wechselstromanlagen alle drei Zweige gleichmäfsig belastet sind, kann man die Gesamtenergie bekanntlich messen, indem man mittels eines Wattmeters die Energie einer Schleife mifst und das erhaltene Resultat mit drei multipliziert. Das ist aber ein Fall, der in der Praxis wohl aufserordentlich selten anzutreffen sein dürfte.

Bei ungleicher Belastung der drei Zweige wird das Messen der Energie mittels zweier Dynamometer auf folgende Weise bewirkt:

Betrachten wir für einen solchen Fall die Sternschaltung. Wenn in Fig. 270 die Spannung zwischen

$$O \text{ und } A = V_I,$$
$$O \text{ „ } B = V_{II},$$
$$O \text{ „ } C = V_{III},$$

und a, b und c die korrespondierenden Ströme bedeutet, dann ist die Energie in Watt ausgedrückt:

$$W = V_I a + V_{III} b + V_{II} c.$$

Nun ist aber nach dem Kirchhoffschen Gesetz:

$$a + b + c = 0, \quad \text{also} \quad a = -b - c.$$

Es ist ferner:

$$V_{III} - V_I = V_{AC} \quad \text{und} \quad V_{II} - V_I = V_{AB}$$

und wir erhalten:

$$W = V_{AC} b = V_{AB} c,$$

d. h. es genügen zwei geeignete Wattmeter zur Ermittelung der

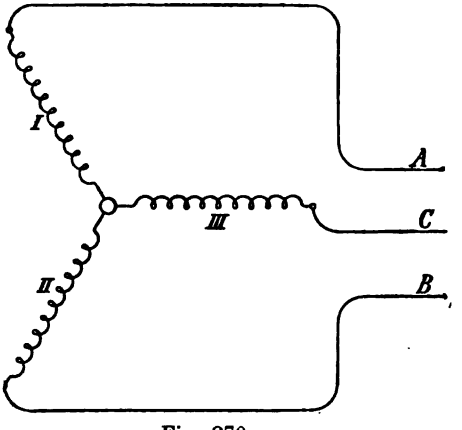


Fig. 270.

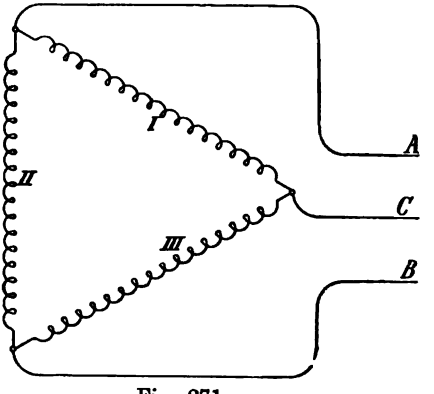


Fig. 271.

gesamten Energie einer Dreiphasenanlage mit Sternschaltung.

Bei der Dreieckschaltung haben wir ganz analoge Verhältnisse:

Bedeutet (Fig. 271) a, b und c die Ströme in den Zweigen I, III und II, also von A nach C, von C nach B und von B nach A. Bezeichnen wir ferner die äufseren Spannungen

$$\text{von } A \text{ nach } C \text{ mit } V_I,$$
$$\text{„ } C \text{ „ } B \text{ „ } V_{III},$$
$$\text{„ } B \text{ „ } A \text{ „ } V_{II}.$$

Auch hier erhalten wir die Gesamtzahl der Watt

$$W = V_I a + V_{III} b + V_{II} c.$$

Nun ist wieder

$$V_I + V_{III} + V_{II} = 0 \quad \text{und} \quad V_I = - V_{III} - V_{II}.$$

Schreiben wir nun:

$$W = - a V_{III} - a V_{II} + b V_{III} + c V_{II}$$
$$= V_{III}(b - a) + V_{II}(c - a)$$

und setzen wir jetzt $(b - a) = q$ und $(c - a) = - p$,

so ist $$W = V_{III} q - V_{II} p.$$

Dabei haben wir die Werte positiv angenommen. Beim Messen und Rechnen im umgekehrten Sinne wird

$$W = V_{III} q + V_{II} p.$$

Um die Energie in einer solchen Anlage zu messen, brauchen wir also auch nur zwei passende Wattmeter. Die Ströme q und p werden durch die Hauptspulen gesendet, die beiden Abzweigspulen legt man an C und B bezw. A und B; die Summe der beiden Mefsresultate ergiebt die Gesamtsumme der in den drei Leitungen fliefsenden Energie.

Auch bei Drehstromanlagen kann man die bekannten „Aronschen Elektrizitätszähler“ verwenden und hat Dr. H. Aron zu diesem Zwecke brauchbare Apparate geschaffen.

Für ein System verketteter Wechselströme mit verschobener Phase solche Apparate zu bauen, bietet aber Schwierigkeiten; denn es mufs berücksichtiget werden, dafs die eigentlichen Nutzströme sich erst in den Ausnutzungsobjekten aus ihrer Verkettung lösen.

Man hat es daher in jeder Zuführung mit der Summe bezw. Differenz zweier benachbarter Nutzströme zu thun. Es ist daher nötig, die Differenz zweier benachbarter Ströme auf die zwischen ihnen liegende Spannung, oder die Differenz zweier Spannungen auf den ihnen gemeinsamen Strom wirken zu lassen und hat dann der Zähler diese drei Glieder zu summieren. Das ist nun sehr schwierig und kompliziert; trotzdem erzielte der oben Genannte eine erfreuliche Vereinfachung auf folgende Weise:

In Fig. 272 sind

A, B und C die Zuführungen bezw. deren Ströme,

a, b und c die nutzbaren Ströme,

α, β und γ die beziehungsweisen Spannungen.

Die Arbeit eines dreiphasigen Drehstromsystemes ist:

$$K = a\alpha + b\beta + c\gamma;$$

darin ist:

$$c - b = A,$$
$$a - c = B;$$
$$\alpha + \beta + \gamma = 0.$$

Dabei ist aber die Selbstinduktion in den Nebenschlufsleitungen gegenüber dem sehr grofsen Widerstande derselben vernachlässigt.

Die obige erste Gleichung bleibt richtig, wenn man das Glied $c(\alpha + \beta + \gamma) = 0$ davon subtrahiert. Wir erhalten demnach

$$K = a\alpha + b\beta + c\gamma - c(\alpha + \beta + \gamma)$$
$$= a\alpha - c\alpha + b\beta - c\beta + c\gamma - c\gamma$$
$$= \alpha(a - c) - \beta(c - b)$$
$$K = \alpha B - \beta A.$$

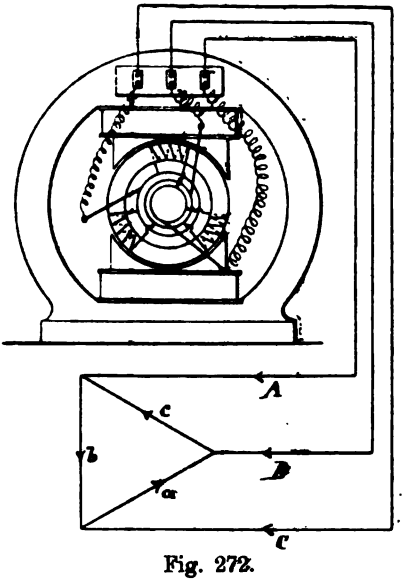


Fig. 272.

Die Kombination, welche diese Gleichung ausdrückt, läfst sich durch die in Fig. 273 gegebene Schaltung herstellen. Dabei ist es charakteristisch, dafs zu solcher Messung der Kraft nur zwei Zuleitungen nötig sind und zwei Nebenschlufsleitungen für die Spannung, was die Anordnung wesentlich einfacher gestaltet.

Natürlich kann man statt der Ströme auch proportionale Ströme durch Abzweigung oder Induktion erzielen und anwenden.

Nach diesem Prinzipe baut Dr. Aron sowohl Uhren- als auch Motorzähler.

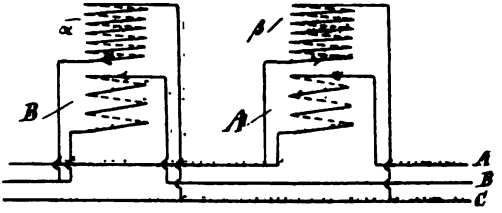


Fig. 273.

Die Fig. 274, S. 364, zeigt einen Uhrenzähler, bei welchem ein Pendel die beiden Nebenschlufsspulen α und β trägt, welche in den Hauptstromspulen schwingen.

Der genannte Konstrukteur wendet aber auch folgendes Prinzip an:

Die beiden messenden Gruppen je eines Haupt- und Nebenschluſs-Stromkreises arbeiten jede für sich, aber im entgegengesetzten Sinne.

Verbindet man die beiden Aufzeichenvorrichtungen durch ein Differentialwerk, so wird dieses ihre Wirkungen addieren, während

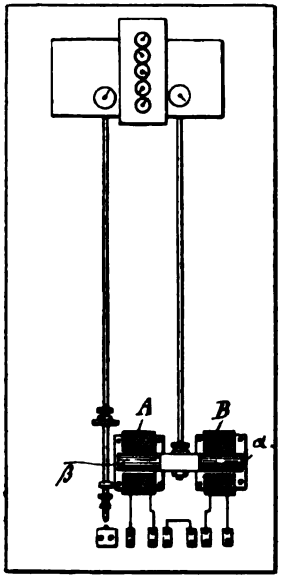


Fig. 274.

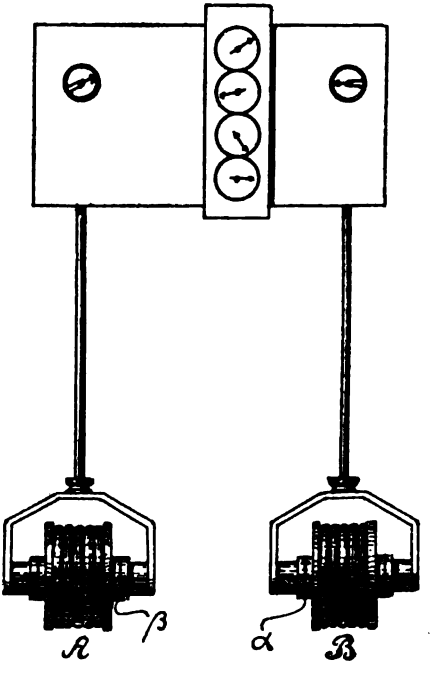


Fig. 275.

es im stromlosen Zustande in seiner Ruhelage verbleibt. Die Fig. 275 zeigt zwei Uhren, deren Pendel mit je einer Nebenschluſsspule α und β versehen sind, die in den Hauptschluſsspulen B und A schwingen; die beiden Uhren sind durch ein Differentialwerk verbunden. Durch ähnliche Vorkehrungen kann man auch die mechanisch aufgezeichneten Angaben zweier Dynamometer summieren.

Anhang.

H. Heinrich Kratzert in Wien hat (E. T. Z. 1893, Heft 19) ebenfalls ein Drehstromsystem vorgeschlagen. Er will auch jede beliebige Dynamo-Gleichstrom-Maschine zur Entsendung von dreiphasigem Strom in drei Linien ausnützen, und geben wir im Nachfolgenden die charakteristischen Merkmale der Kratzertschen Konstruktionen:

Die Fig. 276 zeigt die Gesamtordnung des Kratzertschen Systems:

Die Strom erregenden Spulen werden entweder neben- oder übereinander gewickelt.

In der Dynamo bedeuten die drei konzentrischen Ringe die drei Schleifringe, von welchen die drei niedergespannten Ströme

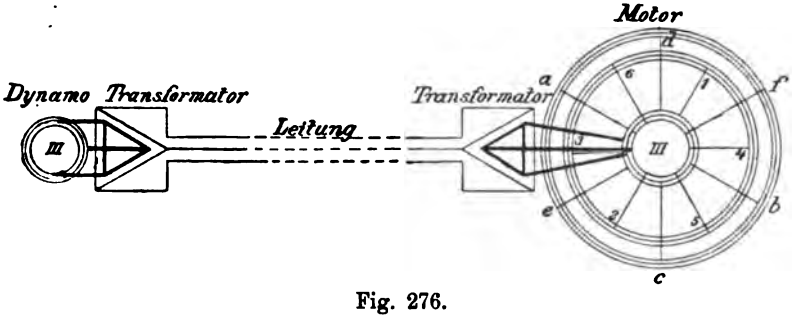


Fig. 276.

in den Transformator geführt werden. Hier wird Hochspannung erzeugt und in die Leitung gesendet, um am Orte der Ausnutzung wieder auf niedergespannten Strom transformiert zu werden. Diese Transformation wird natürlich nur bei Fernleitungen nötig werden. Beim Motor stellen die drei äufsersten Kreise die Drahtlagen des Ankers, die drei nächsten die drei Drahtlagen des Magnets und die drei innersten die Schleifringe des Motors dar.

Anker und Magnet können im Motor hintereinander oder parallel geschaltet werden und ist das ganze System sowohl für Stern- als auch für Dreieckschaltung verwendbar.

Tesla, Dobrowolsky und alle anderen Drehstrom-Konstrukteure verwenden zwei oder mehrere Stromkreise, welche von zwei oder mehreren Strömen verschiedener Phase, aber gleicher Amplitude und gleichem Rhythmus durchflossen sind, Kratzert erklärt jedoch, dafs sich sein System insbesondere von der Tesla-Schaltung dadurch unterscheidet, dafs bei Tesla der Strom jeder einzelnen Phase die von einander getrennten Ankerspulen in Hintereinander-Schaltung durchfliefst, während er (Kratzert) geschlossene Wickelung in Parallelschaltung anwendet, dafs ferner bei Tesla die Ein- und Austrittsstellen der Ströme nebeneinander liegen, während sie Kratzert diametral gegenüberliegend angeordnet hat.

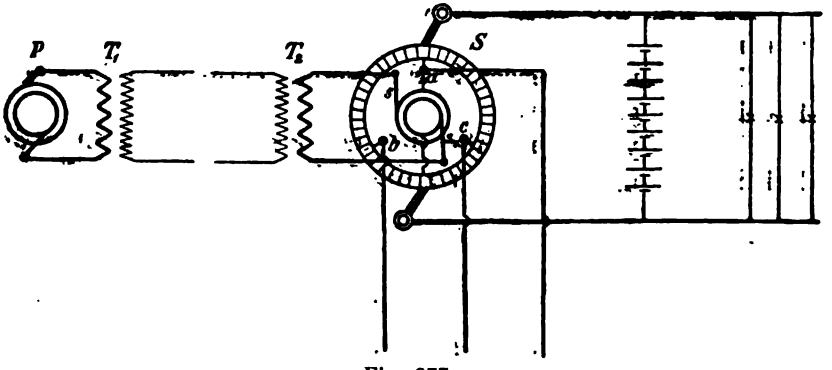


Fig. 277.

Letzterer betont auch, dafs ein Hauptcharakteristikon seiner Anordnung darin gelegen sei, dafs er die Spulen verschiedener Phase nicht nur neben-, sondern auch übereinander wickelt.

Auch C. L. Imhoff hat ähnlich wie H. Teege eine Anordnung vorgeschlagen, mittels welcher Wechselstrom in dreiphasigen Drehstrom verwandelt werden kann. Er kombiniert eine Konstruktion von Helios mit einer, welche sich Bradley in Amerika patentieren liefs und kam zu der in Fig. 277 dargestellten Zusammenstellung: P ist eine primäre Wechselstrom-Maschine, T_1 und T_2 die bei Fernleitungen gebräuchlichen Transformatoren. S ist als Sekundär-Maschine eine gewöhnliche Gleichstrom-Dynamo. In diese wird der Wechselstrom durch die

zwei Schleifringe *ss* eingeleitet, wodurch die Maschine in synchrone Bewegung zur Primär-Maschine versetzt wird. Vom rotierenden Anker dieser Maschine kann nun durch *a b c* dreiphasiger Drehstrom entnommen werden, mittels der gewöhnlichen Kollektorbürsten ist man aber auch im stande, Strom zum Akkumulatorenladen und überhaupt Gleichstrom abzunehmen.

Mit dieser Anordnung ist daher so ziemlich alles geboten, was auf diesem Gebiete besteht: Wechselstrom, Drehstrom und Gleichstrom. Aber schon H. Imhoff selbst verweist darauf, dafs der heutzutage verlangte Wirkungsgrad bei dieser Einrichtung schwerlich erreicht werden dürfte.

Laut einer Mitteilung desselben Konstrukteurs in der E. T. Z. 1894, Heft 47, proponiert er nunmehr eine Anordnung, welche in Fig. 278 bis 280 schematisch dargestellt ist:

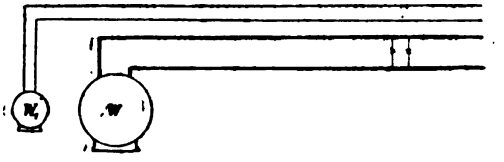


Fig. 278.

Neben der Wechselstrom-Maschine W ist eine kleine Wechselstrom-Maschine W_1 aufgestellt und liefert dieselbe eventuell einen

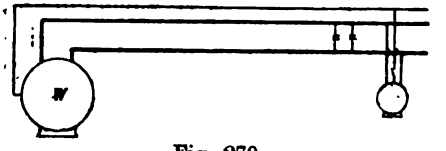


Fig. 279.

um 90° in der Phase verschobenen Hilfsstrom, der mittels besonderer Leitungen zu den Motoren geführt wird. Man braucht zum Hilfsstrom eigentlich nur eine Leitung, da ein Hauptdraht als Rückleitung benutzt werden kann. Versieht man die Maschine W mit einer Nebenwickelung, so kann man auch die Maschine W_1 ersparen (Fig. 279).

Bei Fernleitungen (Fig. 280, Seite 368) aber schaltet man erst an der Verbrauchstelle einen Phasenregler P ein, um denselben Effekt zu erreichen. Der Hilfsstrom hat keine bedeutende Stärke

und wird immer nur für kurze Zeit in Anspruch genommen, er braucht daher nur einen ganz dünnen billigen Leiter.

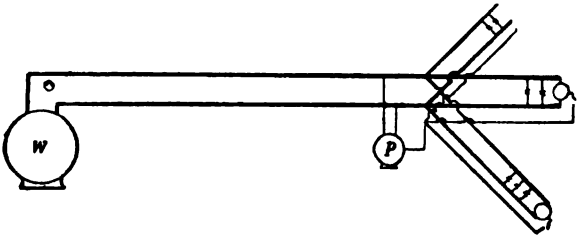


Fig. 280.

Bei solchen Wechselstromanlagen kann man daher Motoren einbinden, die mit Unterstützung des Hilfsstromes belastet angehen.

Monocyclic-System.

Die „General Electric Company“ hat nach dem „Electrical Engineer“ Nr. 334 vom 26. September 1894 ein neues Wechselstromsystem unter obiger Bezeichnung veröffentlicht:

Wenn in einem Induktions-Motor, Fig. 281, eine Spule von Einphasen-Wechselstrom durchflossen ist, so wird in den kurzgeschlossenen Armaturwickelungen unter der Spule AB ein sekundärer Strom erzeugt, welcher um 90° hinter dem Magnetismus der Spule AB zurückbleibt. Dieser Sekundärstrom polarisiert in derselben Richtung wie AB und man erhält daher kein Drehmoment. Wenn man aber z. B. durch eine Multiplikation CD einem zum früheren, rechtwinkelig und in der Phase verschobenen, magnetischen Pol erregt, so wird dieser Pol ein Drehmoment mit den induzierten Ankerströmen erzeugen. Die Zusatzspule CD bedingt nur den Aufwand eines geringen, praktisch wattlosen Magnetisierungsstromes, der um 90° gegen den Strom in AB versetzt ist; deswegen mufs auch in der Wechselstrom erregenden Dynamo die entsprechende Zusatzspule so angebracht sein, dafs sie einen um 90° versetzten Strom zum Hauptstrome liefert.

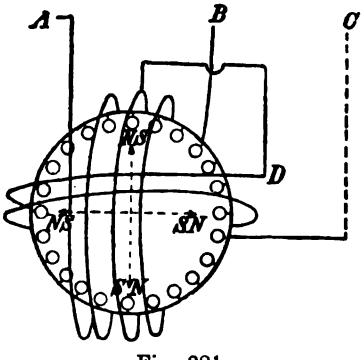


Fig. 281.

Läuft nun ein solcher Motor, so erzeugt der in der Armatur induzierte Strom, welcher durch die Drehung der Armatur mitgenommen wird, und dessen Stärke nicht sofort auf den Nullwert herabsinkt, einen verschobenen Pol und induziert in der Spule DC eine genügende EMK, um auch noch die Zusatzspulen anderer von derselben Verteilungsleitung gespeisten Motoren zu erregen. Verbindet man dann die Zusatzspulen aller Motoren miteinander mittels eines Ausgleichsdrahtes, so wird es, wenn auch nur ein einziger Motor läuft, genügen, um alle miteingeschalteten Motoren zu einem Anlaufen mit voller Kraft zu befähigen. Der Ausgleichsdraht führt dabei nur einen schwachen Magnetisierungsstrom, er braucht daher nur wenig Kupfer.

Man kann die Ausgleichsleitung auch bis zur Maschine zurückführen und hier an besondere kleine Zusatzspulen anschliefsen.

Wird nun nur Licht erzeugt, so genügt die Hauptleitung; sollen gleichzeitig auch Elektromotoren laufen und kräftig angehen, dann benutzt man die Ausgleichsleitung in der angegebenen Form.

Eine besondere Mittelleitung für Motoren aufzustellen, hat übrigens auch Schallenberger vorgeschlagen, wie auf Seite 124 dieses Buches erörtert worden ist.

Kombination des Zwei- und Dreiphasenstrom-Systems.

Ch. F. Scott hat versucht, die Vorzüge beider Drehstromsysteme zu vereinigen und zwar auf folgende Weise:

Wir haben gesehen, dafs, wenn zwei in der Phase differierende elektromotorische Kräfte hintereinander geschaltet werden, die resultierende Spannung im allgemeinen im Werte und in der Phase von beiden Komponenten verschieden ist.

Unterscheiden sich zwei Spannungen in der Phase um 90° und schaltet man beide hintereinander, so wird die resultierende Spannung der Gröfse und Richtung nach durch die Hypothenuse eines rechtwinkeligen Dreiecks dargestellt, dessen Katheten die komponierenden Spannungen sind.

So ist in der Figur 282, Seite 370, wenn AO und OB zwei zu rechten Winkeln hintereinander geschaltete Spannungen sind, die Resultante die Linie AB und diese hat verschiedene Phase zu

den beiden anderen. Es ist eine einfache Sache, die Komponenten so zu wählen, dafs $OB = \frac{1}{2} AB$ wird, wie es die Figur zeigt. Ebenso ist leicht einzusehen, dafs dieselbe Spannung OA mit OC — bei einer Phasendifferenz von 90° —, welche gleich und entgegengesetzt zu OB so kombiniert werden kann, dafs $AC = AB$, aber verschieden in der Richtung wird. BO und OC vereinigt geben BC. Die Spannung BC kann daher mit der Spannung AO in rechten Winkeln so in Abhängigkeit gebracht werden, dafs es Zusatzspannungen AB und CA giebt, die, in Verbindung mit BC drei gleiche Spannungen, jede für sich, von 120° Phase geben.

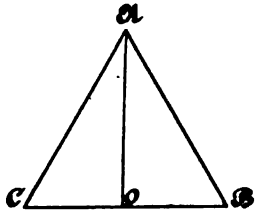


Fig. 282.

Die Anwendung dieses Systems auf Transformatoren zeigen die folgenden Fig. 283 und 284.

Die primären Windungen zweier Transformatoren sind mit

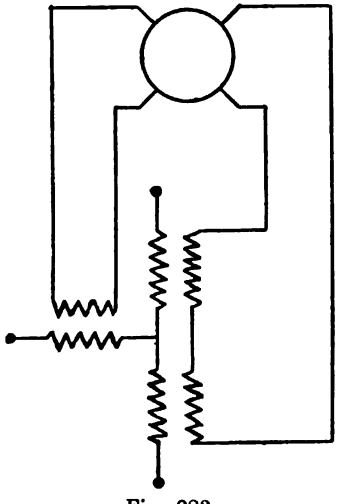


Fig. 283.

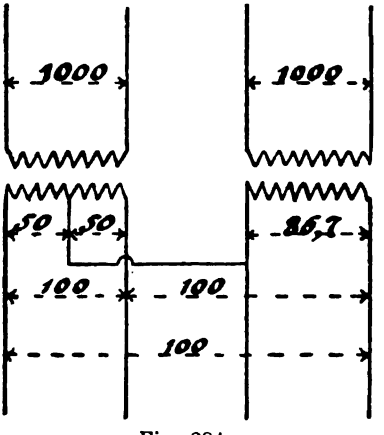


Fig. 284.

einer Erzeuger-Dynamo verbunden, die Zweiphasenstrom giebt. Daher differieren die sekundären Spannungen um 90°. Eine sekundäre Spule ist zu 100 Windungen gewickelt und ein Drahtanschlufs in der Mitte giebt 50 Windungen nach jeder Seite. Die zweite sekundäre Spule hat 87 Windungen, das sind ungefähr

$50 \times \sqrt{3}$. Ein Ende des sekundären Stromkreises ist mit der Mitte der sekundären Spule des ersten Transformators verbunden, wie es die Figur zeigt, und die drei freien Klemmen geben Spannungen, die in der Phase um 120° differieren. Wenn die Spannung an jeder primären Spule 1000 Volt und an einer sekundären 100 Volt, an der anderen aber (78) Volt beträgt, so wird die zwischen zwei beliebigen sekundären Klemmen gemessene Spannung 100 Volt sein. Dieser Dreiphasen-Stromkreis ist angenommen worden, um auf Dreiphasen-Motoren zu arbeiten. Bei einem solchen Übertragungssystem können also Zweiphasenströme an der Erzeuger-Dynamo in Dreiphasenströme umgewandelt werden, und die Windungen können so gewählt sein, dafs die Spannung für die äufsere Leitung erhöht wird. Vice versa kann am anderen Ende der Leitung Dreiphasenstrom in Zweiphasenstrom verwandelt werden, falls das ausnahmsweise erwünscht sein sollte. 87

Wenn Lampen auf den Transformator, der direkt von seinen beiden Klemmen speist, gebracht werden, so geschieht die Übertragung direkt von der Erzeuger-Dynamo, ohne irgendwie den andern Strom zu beeinflussen, da die Erzeugerklemmen direkt mit den ersten Primärwindungen verbunden sind; die sekundären des erhöhenden Transformators haben direkte Leitung zu den Primärwindungen des erniedrigenden Transformators und der Strom von ihm wird direkt zur Belastung geführt. Auf der anderen Seite wird, wenn der andere Strom belastet wird, auch hier die Wirkung auf seinen eigenen Erzeugerstromkreis stattfinden, ohne den ersten zu beeinflussen. Der Strom vom erhöhenden Transformator gelangt in diesem Stromkreise zur Mitte der sekundären Windungen des anderen Transformators, wo er sich teilt und parallel durch die beiden Teile der Spule und zwei der Leitungen fliefst. Da eine Hälfte des Stromes durch jeden Teil der sekundären Spule in entgegengesetzter Richtung fliefst, wird die Selbstinduktion vollständig aufgehoben und die Transformatoren in diesem Stromkreise sind unabhängig von dem Betriebe des anderen Kreises. Es ist zu bemerken, dafs unter dieser Bedingung die Leitungsspannung, welche dieser Transformator liefert, nur 87% von der vom ersten gelieferten beträgt. Indessen wird die geringere Spannung weit durch die Thatsache ausgeglichen, dafs der Strom auf einer Seite durch zwei

Leitungen parallel geführt, der Widerstand des Kreises also verringert wird.

Die Wirkung auf die Regulierung des Erzeugers findet man, wenn Zweiphasenströme am Ende einer Dreiphasen-Übertragungsleitung belastet werden, sowohl nach der Theorie wie durch den Versuch, besonders wenn die Belastung direkt auf den entsprechenden Strom des Erzeugers gebracht wird. Eine Abänderung dieses Systems findet man in der Anordnung, bei welcher der Dreiphasenstrom im Erzeuger geliefert und durch drei Drähte nach den Transformatoren geführt wird. Diese Transformatoren können so wie bei den für zwei Phasen angegebenen angeordnet werden. Belastung kann auf jedem der Zweiphasenströme erfolgen und praktisch wird dieselbe Regulierung des Erzeugers herauskommen, die herauskommen würde, wenn der Erzeuger selbst für zwei Phasen gewickelt und einer dieser Stromkreise belastet wäre. Auf diese Weise ist es möglich, eine Beleuchtungsbelastung auf einen Dreiphasenerzeuger in zwei anstatt drei Einheiten (Phasen) zu bringen und die schlechte Regulierung, die bei ungleicher Belastung auftritt, im Erzeuger zu umgehen.

Eine ähnliche Anordnung von zwei Transformatoren kann getroffen werden, um drei Phasen eines Potentials in drei Phasen eines anderen Potentials zu verwandeln.

Der Wirkungsgrad zweier Transformatoren, die so angeordnet sind, dafs sie vom Zweiphasen- nach dem Dreiphasensysteme umwandeln, wird gegen die Arbeit auf eine gewöhnliche Belastung um keinen erheblichen Betrag heruntergedrückt. Falls der Wirkungsgrad unter gewöhnlichen Umständen 97,5% beträgt, sinkt er angeblich hier auf 97,4%, wenn von einer Anzahl Phasen nach der anderen transformiert wird.

Bei der enormen Ausbildung des Dreiphasensystems und der geringen Ausbreitung des Zweiphasensystems ist es aber sehr unwahrscheinlich, dafs von der Scottschen Anordnung viel Gebrauch gemacht werden wird.

Glühlampen für dreiphasigen Drehstrombetrieb[1]).

Die Firma Siemens & Halske in Berlin erhielt schon im Jahre 1891 ein Patent auf eine Glühlampe mit drei Kohlenbügeln,

[1]) Zentral-Anzeiger für Elektrotechnik; Nr. 22, 1895.

welche bestimmt war, in Anlagen zu funktionieren, die mit dreiphasigem Drehstrome betrieben werden, wie z. B. solche in Chemnitz, Strassburg und auch schon an anderen Orten errichtet worden sind. Wenn beispielsweise *A*, *B* und *C* gegeben sind, welche den gekennzeichneten Drehstrom führen, so lassen sich die Stromaufnehmer im wesentlichen auf zweierlei Arten zwischen die genannten drei Leiter einschalten, entweder werden sämtliche Stromaufnehmer ihrer Anzahl nach in drei gleiche Teile geteilt und die zu je einem Teile gehörigen nebeneinander zwischen je zwei der drei gegebenen Leitungen eingeschaltet, Fig. 285, oder aber es werden die zu je einem der drei Teile gehörigen Stromaufnehmer mit je einem der drei gegebenen Leiter verbunden und sämtliche freien Pole an einen gemeinsamen Punkt geführt, Fig. 286. Da nun die Möglichkeit bestehen muss, dafs im Verlaufe des Betriebes beliebige Stromaufnehmer aus- und eingeschaltet werden können, so wird es unvermeidlich sein, dafs Verschiedenheiten in der Belastung der drei gegebenen Leiter *A*, *B* und *C* eintreten. Siemens & Halske proponierten eine Glühlampe, an deren Speisung alle drei Leitungen *A*, *B* und *C* gleichmäfsig beteiligt sind. Fig. 288 bis 291 stellen die Lampe dar.

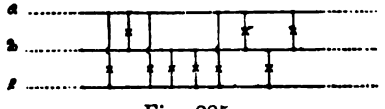


Fig. 285.

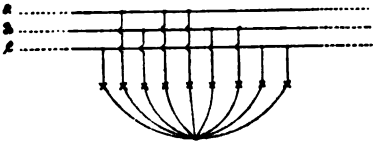


Fig. 286.

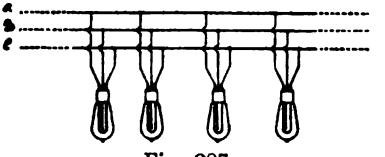


Fig. 287.

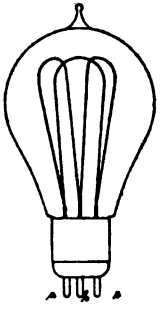


Fig. 288.

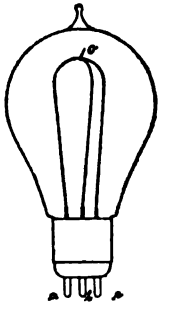


Fig. 290.

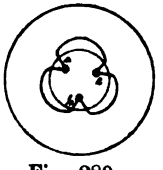


Fig. 289.

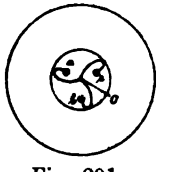


Fig. 291.

Der Glaskörper der Lampe

ist in bekannter Weise gebaut, die Fassung aber erhält drei Elektroden (oder der Anzahl der Drehstromleitungen *A*, *B* und *C* etc. entsprechend mehr) und der Hals des Glasträgers ebenso viele Stromeinführungen.

Der Kohlenfaden kann den beiden Schaltungsarten, Fig. 289 und 291, entsprechend auf zweierlei Weisen hergestellt werden, entweder, indem je zwei von den drei Elektroden *a*, *b* und *c* durch je einen Kohlenbügel bekannter Form verbunden werden, Fig. 288 und 289, oder indem der Kohlenfaden aus drei Schenkeln hergestellt wird, welche in einem Punkte *O* im Innern der Lampe miteinander verbunden werden, und deren freie Enden an die drei Einführungen und somit an die drei Elektroden *a*, *b* und *c* angeschlossen werden, Fig. 290 und 291. Das Wesen der Konstruktion besteht aber nur darin, dafs er alle drei Elektroden untereinander durch gleiche Widerstände verbindet.

Siemens & Halske erachten es für selbstverständlich, dafs die besondere Anordnung der Kohlenfaden im einzelnen noch mancherlei Abänderungen zuläfst, und betrachten als den Gegenstand ihrer Erfindung nur überhaupt ein System von Kohlenfaden beliebiger Anordnung im einzelnen, welches der Bedingung genügt, entweder nach Schaltungsschema Fig. 289 und 291 die drei oder mehr Elektroden der Lampe durch gleiche Widerstände untereinander zu verbinden.

Fig. 287, Seite 373, stellt die Verwendungsart der beschriebenen Lampe dar. An den Drehstromleitungen *A*, *B* und *C* werden an beliebigen Punkten je drei Zweigleitungen angeschlossen, welche die Leitungen *A*, *B* und *C* mit den Elektroden *a*, *b* und *c* je einer Lampe verbinden. Es ist ohne weiteres ersichtlich, dafs bei dem Gebrauche der gekennzeichneten Lampe eine Verschiedenheit der Belastung zwischen den drei Leitungen *A*, *B* und *C* niemals vorkommen kann, wie grofs auch immer die im täglichen Betriebe vorkommende Verschiedenheit in der Gebrauchsdauer der einzelnen Lampen sein mag.

Als nach dem Jahre 1891 die Verwendung und praktische Ausnutzung des Dreiphasen-Drehstromes in Frage stand, hat man offenbar auch diese Erfindung nicht weiter ausgebildet; wenigstens ist nichts Weiteres darüber veröffentlicht worden. Nunmehr aber, wo der Drehstrom immer mehr und mehr an Bedeutung gewinnt, erscheint es an der Zeit, auf diese Erfindung neuerdings zu ver-

weisen und könnte vielleicht dadurch die wichtige Frage der gleichmäfsigen Belastung in den drei Schleifen solcher Anlagen einer gedeihlichen Lösung entgegengeführt werden.

Dreiphasiger Wechselstrom zur elektrischen Fernübertragung von Zeigerstellungen.

Die elektrische Telegraphie hat ihre besondere Bedeutung erst infolge der Konstruktion des Wheatstoneschen Zeigertelegraphen (1843) erhalten. Die von der bayerischen Regierung preisgekrönte Kombination eines Magnetinduktors mit einem Zeigerapparat (1848) von Siemens & Halske veranlafste den enormen Aufschwung des Telegraphenwesens. Sowie nun die Telegraphen-Zeigerapparate das Fernschreibwesen inaugurierten, so scheint es auch, dasselbe zu neuer Blüte bringen zu sollen, denn es kann nicht geleugnet werden, dafs das Fernsprechwesen dem Telegraphen eine gefährliche Konkurrenz bereitet. L. Weber in Kiel hat wenigstens einen elektrischen Fernschreiber konstruiert, der bis jetzt viel zu wenig gewürdigt worden ist und in Nachstehendem nach den Darstellungen des Konstrukteurs beschrieben werden soll:

Wendet man zu dem oben bezeichneten Zwecke die dem Dreh- oder Mehrphasenstrom eigentümliche Stromleitung an und benutzt man als Geber einen besonderen, sogleich näher zu beschreibenden ringförmigen Apparat, dessen allgemeiner Charakter derjenige eines Generators oder Transformators aus Gleichstrom in Drehstrom ist, während als Empfänger ein besonderer, einem Drehstrom-Motor ähnlicher Apparat dient, so ist die Aufgabe lösbar, die Stellung oder den Gang eines gebenden Zeigers auf einen zweiten empfangenden zu übertragen und mit Hilfe von nur wenigen, z. B. drei Fernleitungsdrähten für jede beliebige Einstellung des gebenden Zeigers die genau korrespondierende des empfangenden Zeigers in kontinuierlicher, nicht sprungweise erfolgender Bewegung hervorzurufen.

Es wird zu diesem Zwecke als Geber *G* (Fig. 292, Seite 376) ein festliegender leitender Ring *b* angewendet. Der Widerstand desselben mufs ein grofser und innerhalb ziemlich weiter Grenzen demjenigen des Empfängers und der Fernleitung angepafst sein. Die geometrische Gestalt der Ring-Querschnitte ist hierbei unwesentlich. Derselbe kann z. B. ersetzt werden durch eine

ringförmige Spirale oder Zickzacklinie, deren Anfang und Ende verbunden sind, oder durch eine sehr grofse Zahl kreisförmig angeordneter Stromschussklötze, welche unter sich durch lauter gleiche Widerstände verbunden sind. An drei oder mehreren Stellen des ringförmigen Leiters *b* sind festliegende Fernleitungsdrähte *c* angeschlossen. Ein vorhandener Gleichstrom wird in den Ring mittels zweier diametral gegenüberstehender, konzentrisch mit dem Ringe drehbarer Bürsten *d* eingeführt. Mechanisch mit den Bürsten verbunden ist ein ebenfalls konzentrisch mit ihnen sich drehender Zeiger *f*. Dies ist der gebende Zeiger. Je nach der Stellung desselben wird alsdann den Fernleitungsdrähten eine variable, den Widerstandsverhältnissen der jeweiligen Ringeinteilung entsprechende Stromintensität zugeführt.

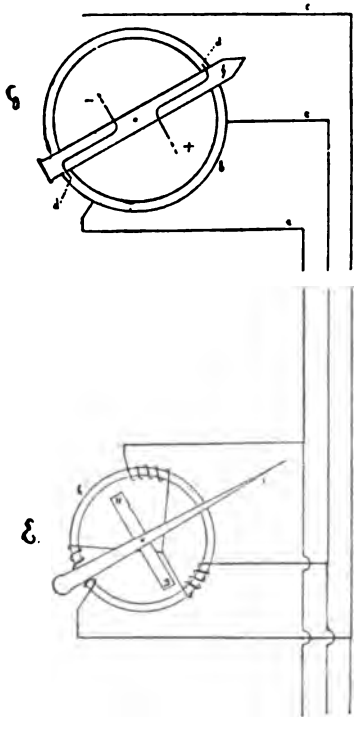


Fig. 292.

An dem Endpunkte der Fernleitungsdrähte *c* befindet sich der Empfänger *E*, bestehend aus einem eisernen Ringe *h*, um welchen, der Wickelung des Gebers und der Zahl der Fernleitungsdrähte entsprechend, drei oder mehr Drahtspulen gelegt sind. In dem Zentrum des Ringes *h* dreht sich alsdann eine Magnetnadel *NS* synchron, kongruent und kontinuierlich mit dem gebenden Zeiger. Mit der gedämpften Magnetnadel wird der empfangende Zeiger *i* mechanisch verbunden. Jeder Ruhelage und Bewegung des Zeigers *f* entspricht demnach eine gleiche des Zeigers *i*.

Dieses System korrespondierender Zeiger wird zunächst dahin erweitert, dafs durch Abzweigung oder auch durch Serienschaltung derselbe Mehrphasenstrom durch zwei oder mehrere Empfängerapparate gleicher Beschaffenheit geleitet wird, so dafs die zwangsläufige Bewegung des einen gebenden Zeigers zwei

oder mehrere empfangende Zeiger gleichmäfsig einstellt. In der Fig. 292 denke man sich zu diesem Zwecke an die drei Drähte *c* noch einen mit *E* gleich konstruierten weiteren Apparat oder deren mehrere angeschlossen.

Durch die weitere Kombination zweier Systeme (Fig. 293) von korrespondierenden Zeigern der beschriebenen Art wird die Aufgabe gelöst, die Bewegung eines Punktes in der Ebene, also z. B. eines Schreib- oder Markierstiftes, in die korrespondierende kongruente Bewegung eines empfangenden Markierpunktes zu übertragen. Zu diesem Zwecke stellt man zwei von einander elektrisch unabhängige Geber mit ihren genügend verlängerten Zeigern *f* so auf, dafs letztere sich nahe senkrecht überschneiden. Durch Längsschlitze *k* in beiden Zeigern geht der gebende Markierstift *l*. Derselbe befindet sich also im Durchschnittspunkte der beiden Zeiger. Die beiden empfangenden, elektrisch und magnetisch von einander unabhängigen Ringe werden so gestellt, dafs ihre genügend verlängerten magnetischen Zeiger *i* sich nahezu rechtwinkelig überschneiden. Bei einmal hergestellter geometrischer Ähnlichkeit derjenigen beiden Dreiecke, welche durch die Zeiger und die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte gebildet werden, ist alsdann die Bewegung des Durchschnittspunktes *m* der empfangenden Zeiger geometrisch ähnlich mit derjenigen des gebenden Markierstiftes. Ein von *l* mit der Hand geschriebenes a wird z. B. durch die Bewegung des Punktes *m* auf der empfangenden Station zum Vorschein kommen.

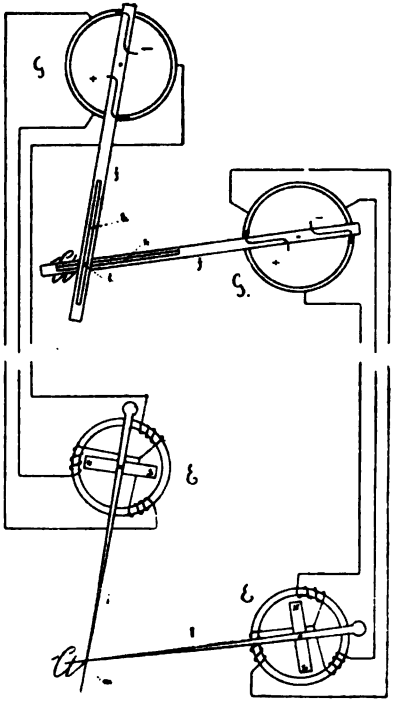


Fig. 293.

Zusammenstellung der beim Wechsel- und Drehstrome vorkommenden besonderen Beziehungen und Bezeichnungen.

Seite

$E = a\frac{dJ}{dt}\iint\frac{ds \cdot ds'}{r}\cos\varepsilon$ 9

Wechsel; Periode 9

Sinuskurve . . . . . 11 und 134

$E = \frac{1}{10^8} H\,ds\,\frac{dx}{dt}\cos\psi\sin\varrho$ Volt 15

$L = \frac{\sqrt{R_1^2 - R^2}}{2\pi p}$ 19

Uhrzeiger-, Wellen- und Polar-Diagramme 21

Veränderungswinkel 22

$R = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} r^2\,d\Theta}$ 24

$J = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,J_{max}$ 25

$E = e_{eff}\sqrt{2}$ und $J = i_{eff}\sqrt{2}$ 26

$EJ\,dt = J^2 R\,dt + L\frac{dJ}{dt}J\,dt$ (Energie-Gleichung) 27

$E = JR + L\frac{dJ}{dt}$ 28

$J = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$ 29

Impressed electro-motive force 30

Phasen-Verschiebungswinkel φ 31

Impedanz $= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ 32

Induktanz (Reaktanz) $= \omega L$ 32

Bedeutung der Mittelwerte $M(E)$, $M(J)$ u. s. f. 32

$E = 2\,p\,w\,N\,10^{-8}$ Volt 33

Negative, scheinbare, wirkliche Watt 35

Wattloser Strom (Erregerstrom) . . . . . 36, 75 und 349

Arithmetrisches und geometrisches Mittel 37

$e_{eff} = k\,p\,s\,N\frac{n}{60}\,10^{-8}$ Volt 37

Die Kappsche Konstante k 38

Konstantes und oscillierendes Feld 46

Synchronismus 65

Summieren der Wechselströme 74

Wattstrom 75

Zweiphasiges Drehfeld . . . . . 82, 94, 98 und 218

Seite

Kunstphase 110
Dreiphasiges Drehfeld . . . . . 125 und 128
$\Sigma J = J_1 + J_2 + J_3 = J_0\left[\left(\sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)\right] = 0$. 133
Stern- und Dreieck-Schaltungen (A. E.-G.) . . . . . 140, 149 und 161
$2 \sin 60^0 i_{max} = 1{,}732\, i_{max}$ und $2 \sin 30^0 i_{max} + i_{max} = 2\, i_{max}$ 147
$e_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n} E_{max}$ 160
Dreieckschaltung (1 A., 1,732 V.), Sternschaltung (1,732 A., 1 V.) . . . 161
Wechselzahl = Polzahl × Umdrehungen in der Minute (bei Dynamos) . 162
Gleichstrom $P = EJ$; Wechselstrom $P = \frac{E_{max} J_{max}}{2} \cos \varphi$ 211
Anker. — Feld 218
Polzahl der Drehstrom-Motoren 220
Die Schlüpfung $= p_1 - p_2 = 2\pi n_1 - \frac{\pi n_2}{30}$ 221
Kraftlinienverlauf in Drehstrom-Motoren 221
Drehungsrichtung in Drehstrom-Motoren 222
Spannungs-Diagramm beim Zweiphasen-Stromerzeuger 226
Schaltung des Feldes in Drehstrom-Motoren 232
Kurzschlufsanker A. E.-G. 234
Kurzschlufsanker Lahmeyer 236
Umschalter für Drehstrom-Motoren 239
$\frac{n}{60}$ = Wechsel : Polzahl (bei Motoren) 244
Wirkungsgrad, Leistungsfaktor 257
Abweichung von der Sinuskurve 259
Theorie der Drehstrom-Motoren 261
Drehstrom-Transformator mit kreisender magnetischer Achse 299
Sternschaltung mit Nullleitung 301
$E = 2\, \varepsilon \cos \frac{180^0 - 120^0}{2} = \sqrt{3}\, \varepsilon$ 304
$A = \sqrt{3}\, \varepsilon J \cos \varphi$ 304
$\underbrace{N \text{ bis } a}_{\text{Phasenspannung.}}$ 110 Volt; $\underbrace{a \text{ bis } c}_{\text{Hauptspannung.}}$ $(110 \times 1{,}732 =)$ 190 Volt 305
Wirkungsgrade und Leistungsfaktor 294
$3\, i\, e = 3\, e \frac{J}{2 \sin 60^0} = 1{,}732\, J\, e$ 314
$q = \frac{2\, L\, W}{E^2 p\, (\cos \varphi)^2}$ 317
$q = \frac{J l x}{\Delta E}$; $q = \frac{J l x}{3 \Delta E}$; $q = \frac{J 2 l x}{\Delta E}$ 317
Der induktive Spannungsabfall 321
Phasenlampen 334
Parallel- und Abschalten von Wechselstrom-Dynamos 335

Seite

Phasenmeter (Leerstrommesser) 348
Idle-current, Drosselspulen, Drosselspannung, Ladespannung 349
Der Formfaktor

$$f = \frac{\text{Quadratwurzel aus mittlerem Quadrat}}{\text{Mittelwert}} = \frac{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} y^2 \cdot dt}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} y \cdot dt} \quad \ldots \ldots \quad 392$$

Zusammenstellung der in diesem Buche beschriebenen Konstruktionen.

Seite

Das Experiment von Arago 3
Baily-Drehstrom-Apparat 3
M. Deprez-Drehstrom-Apparat 4
Magneto-Induktoren von Siemens, Pixii, Nollet 17
Helios-Gleichstrom-Wechselstrom-Maschine 41
Wechselstrom-Maschinen von Mordey, Kapp, Helios 43
Wechselstrom-Motor von Patten 49
Wechselstrom-Motor von Helios 52
Wechselstrom-Motor von Oerlikon 59
Wechselstrom-Maschine von M. Hutin und M. Leblanc 65
Wechselstrom-Maschine von Schuckert 72
Wechselstrom-Motor von Oerlikon 73
Hinderung des Aufsertrittfallens nach A. E.-G.-Anordnung 76
Drehstrom-Motor des Ferraris 84
Konstruktion Zipernowsky und Deri (D. R.-P. 53416) 88
Schuckerts Zweiphasen-Maschine, System Bradley 92
Tesla Zweiphasen-Konstruktionen 95
Kunstphase. System Zipernowsky und Deri . . . . . 110 und 112
Konstruktionen nach Wahlström 117
Konstruktionen nach Schallenberger 131
Dreiphasen-Konstruktionen der A. E.-G. 141
Dreiphasen-Konstruktionen von Haselwander 154
Zweiphasen-Dynamo, System Bradley, Konstruktion Schuckert 157
Zweiphasen-Dynamo, System Tesla, Konstruktion Westinghouse 158
Dreiphasen-Dynamo System und Konstruktion A. E.-G. 161
Dreiphasen-Dynamo System und Konstruktion A. E.-G. (neueste Type) . 165
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Oerlikon 173
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Oerlikon (neueste Type) . . 178 und 209
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Siemens 179

Seite

Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Schuckert 181
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Houtin und Leblanc 182
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Sohlmann 190
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Schwartzkopff 195
Dreiphasen-Dynamo Konstruktion Dickmann 199
Einfache Wechselstrom-Motoren Konstruktion Brown 215
Zweiphasige Wechselstrom-Motoren Konstruktion Tesla 217
Zweiphasige Wechselstrom-Motoren Konstruktion Westinghouse 227
Zweiphasige Wechselstrom-Motoren Konstruktion Stanley (Sahulka) . . 229
Drehstrom-Motoren Konstruktion Dobrowolsky . . . . 231, 240 und 244
Kurzschlufsanker A. E.-G. 234
Kurzschlufsanker Lahmeyer . . . . . 236 und 241
Drehstrom-Umschalter 239
Drehstrom-Motoren Siemens & Halske . . . . . 233 und 247
Drehstrom-Motoren System Rotten . . . . . 249 und 251
Konstruktion Helios 252
Regelungskonstruktion von Krebs, Rotten, Oerlikon, A. E.-G. und Siemens 273
Kaskadenschaltung von Siemens & Halske 289
Transformatoren der A. E.-G. 297
Phasenlampen 334
Voltmeter von Cardew 345
Phasenmeter (Leerstrommesser) der A. E.-G. 350
Elektrizitätszähler, Konstruktion Aron 362
Drehstromsystem Kratzert 365
Drehstromsystem Imhoff 366
Monocyclic-System 368
Die Kombination von Scott 369
Dreiphasen-Lampen von Siemens & Halske 372
Dreiphasen-Zeigertelegraph von Weber 375

Tabelle I.

Die verschiedenen Maschinen-Konstruktionen für Wechselstrom.

Älteste Typen.

1. Wechsel- (W.) -Strom- (S.) -Maschinen (M.) mit permanenten Magneten und rotierendem Anker.	**Type.**	Faraday, Pixii, Stöhrer, Siemens, Alliance.
2. W.-S.-M. mit besonders erregten Elektromagneten und rotierendem Anker.	„	Lontin, Siemens, Ladd, Wilde.
3. W.-S.-M. mit Selbsterregung und rotierendem Anker.	„	Ganz & Co., Siemens.

Neue Typen.

4. W.-S.-M. mit Selbsterregung und zylindrischen Elektromagneten in Feld und Anker.	**Type.**	Ganz & Co., Siemens, Westinghouse, Brush.
5. W.-S.-M. mit besonderer Erregung und zylindrischen Elektromagneten in Feld und Anker.	„	Ganz & Co., Siemens, Westinghouse, Helios.
6. W.-S.-M. mit gemischter Erregung und zylindrischen Elektromagneten in Feld und Anker.	„	Westinghouse.

Neueste Typen.

7. W.-S.-M. mit Wechselpolen, glatten Ankern und aufgelegter Lagenwickelung.	**Type.**	Siemens, A. E.-G., Oerlikon, Schuckert, Westinghouse, etc.
8. W.-S.-M. mit Gleichpolen, glatten Ankern und aufgelegter Lagenwickelung.		
9. W.-S.-M. mit Wechselpolen und Lochankern.		
10. W.-S.-M. mit Gleichpolen und Lochankern.		
11. Dynamo-Gleichstrom-Maschinen für zweiphasigen Drehstrom eingerichtet.	**Type.**	Schuckert, Westinghouse.
12. Dynamo-Gleichstrom-Maschinen für dreiphasigen Drehstrom eingerichtet.	„	A. E.-G., Siemens, Oerlikon, Schuckert.
13. W.-S.-M. mit Eisen im Anker.	**Type.**	Kapp.
14. W.-S.-M. ohne Eisen im Anker.	**Type.**	Mordey, Ferranti.

Tabelle II.

Drehstrom-Dynamo-Maschinen der A. E.-G.

Gröfse	Spannung zwischen zwei Leitungen	Stromstärke in jeder Leitung. Ampère ca.	Leistung in Kilowatt ca.	Kraftverbrauch in PS ca.	Umdrehungen pro Minute bei 100 Wechsel per Sekunde	Gleichstrom-Erregung in Ampère bei 110 Volt ca.
DM_{300}	120	175	$\cos\varphi \times 36$	$\cos\varphi \times 54$	750	10
	200	105	$\cos\varphi \times 36$	$\cos\varphi \times 54$	750	10
DM_{600}	120	350	$\cos\varphi \times 80$	$\cos\varphi \times 120$	430	18
	200	230	$\cos\varphi \times 80$	$\cos\varphi \times 120$	430	18
LDM_{800}	200	260	$\cos\varphi \times 90$	$\cos\varphi \times 135$	215	26
LDM_{1200}	200	360	$\cos\varphi \times 125$	$\cos\varphi \times 190$	215	30
O_{600}	Werden bis 5000 Volt gebaut.		$\cos\varphi \times 80$	$\cos\varphi \times 120$	500	18
O_{2000}			$\cos\varphi \times 300$	$\cos\varphi \times 360$	380	24
A_{140}			$\cos\varphi \times 140$	$\cos\varphi \times 200$	187	30
A_{265}			$\cos\varphi \times 280$	$\cos\varphi \times 400$	150	50

Tabelle III.

Drehstrom-Motoren der A. E.-G.

Größe	Leistung in PS ca.	Spannung zwischen zwei Leitungen	Stromstärke in jeder Leitung. Amp. ca.	Gesamt-Wattverbrauch ca.	cos φ ca.	Umdrehung p. Minute bei 100 Wechsel per Sekunde ca.
DR_1	1/16	110 190	1,3 1,0	115 115	0,5	2700
DR_2	1/8	110 190	2,0 1,2	180 180	0,5	1425
DR_3	1/4	110 190	2,5 1,5	300 300	0,6	1425
DR_5	1/2	110 190	4,3 2,5	530 530	0,7	1425
DR_{10}	1	110 190	8,0 4,6	1000 1000	0,7	1425
DR_{20}	2	110 190	14,0 8,0	1880 1880	0,7	1425
DR_{30}	3	110 190	20,0 11,5	2760 2760	0,75	1425
DR_{30} mod.	2	110 190	14,0 8,0	1880 1880	0,75	950
DR_{50}	5	110 190	30,0 18,0	4430 4430	0,75	1425
DR_{50} mod.	3,5	110 190	23,5 13,5	3200 3200	0,75	950
DR_{80}	8	110 190	47,0 27,0	7000 7000	0,8	1425
DR_{80} mod.	6	110 190	37,0 21,5	5400 5400	0,8	950
DR_{100}	10	110 190	56,0 33,0	8650 8650	0,8	950
DR_{150}	15	110 190	84,0 48,0	12800 12800	0,8	950
DR_{200}	20	110 190	120,0 70,0	17150 17150	0,8	475
DR_{300}	40	110 190	220,0 130,0	34000 34000	0,8	315

Tabelle IV.

Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom-Maschinen

für Licht und Kraftübertragung der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co., Nürnberg.
100 Polwechsel in der Sekunde[1]). Modell W I.

Größe und Leistung in Kilowatt	30	40	50	60	80	100	120	145	175	210	250	300
Kraftverbrauch in PS bei Vollbelastung, einschließlich Erregung	46	60	76	91	120	150	180	214	258	310	370	443
Umdrehungen in der Minute	750	750	600	600	500	425	425	375	300	250	215	187
Wirkungsgrad bei Vollbelastung . ca. %	89	90	90	90	91	91	91	92	92	92	92	92
Nettogewicht der Maschine . . . . kg	1950	2400	3300	3800	6000	7000	7800	9900	11500	13500	16500	20000
Gewicht der verpackten Maschine . . „	2000	2600	3500	4000	6200	7200	8000	10100	—	—	—	—
Riemenscheiben-Durchmesser . . mm ca.	500	550	650	700	900	1025	—	—	—	—	—	—
Riemenscheiben-Breite . . . . „ „	255	280	350	390	440	530	—	—	—	—	—	—
Erreger-Maschine für Riemenantrieb, Modell AF, Größe und Leistung in Kilowatt	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	2	2	2	2
Umdrehungen in der Minute	1600	1600	1600	1600	1500	1500	1500	1500	1100	1100	1400	1400
Nettogewicht der Maschine . . . . kg	100	100	100	100	120	120	120	120	215	215	215	215
Spannungsgrenze . . . . . Volt	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Erreger-Maschine für direkte Kuppelung, Kilowatt	1	1	1	2	2	3	3	3	6	6	8	8
Nettogewicht . . . . . kg	120	120	120	215	215	325	325	215	450	450	620	620
Spannungsgrenze . . . . . Volt	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

[1]) Als die vorteilhafteste Polwechselzahl sowohl für Kraftübertragung als auch für Beleuchtung hat „Schuckert" ebenfalls für alle Wechselstrom-Maschinen 100 (= 50 Perioden) in der Sekunde festgesetzt. Infolgedessen entspricht einer gegebenen Tourenzahl eine bestimmte Polzahl.

Tabelle V.

Dreiphasen-Generatoren der Fabrik „Oerlikon".

50 Cycles. Niedere Spannung { 110 Volt einfach. / 190 Volt verkettet.

Type	300	301	302	303	304	305	306
Kilowatt	19	32	66	100	135	205	350
Ampère pro Phase	57	97	200	333	410	620	1080
Absorbierte Pferdekräfte	30	50	100	150	200	300	500
Wirkungsgrad %	85	87	90	91	92	93	95
Touren per Minute	750	600	400	350	260	190	150
Riemenscheibe { Diameter mm	400	450	600	900	in der Regel direkt gekuppelt oder mit Seilantrieb versehen.		
Riemenscheibe { Breite „	280	350	450	600			
Gewicht { mit Erreger-Maschine kg	1650	2350	4600	6600	8000	12000	18000
Gewicht { ohne Erreger-Maschine „	1400	2100	4200	6100	7600	11300	17200

Tabelle VI.

Dreiphasen-Generatoren der Fabrik „Oerlikon".

Hohe Spannung.

Type			3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006
Kilowatt			19	32	66	100	135	200	342
Ampère bei	1000 Volt		6,3	10,6	22	33,3	45	66	114
	2000 „		3,1	5,3	11	16,6	22,5	33	57
	3000 „		—	3,5	7,3	11,1	15	22	38
Absorbierte Pferdekräfte			30	50	100	150	200	300	500
Wirkungsgrad %			85	87	90	91	92	92	93
Touren pro Minute			750	600	500	500	375	250	190
Riemenscheibe	Diameter	mm	400	450	600	600	900	in der Regel direkt gekuppelt oder mit Seiltrieb versehen.	
	Breite	„	280	350	450	550	600		
Gewicht mit Erreger-Maschine		kg	1650	2600	3600	5000	7000	9000	13000
Gewicht der Spannschienen		kg	90	120	160	230	—	—	—

Tabelle VII.

Drehstrom-Motoren der Fabrik „Oerlikon“.

50 tolale Stromwechsel. — Spannung { 110 Volt einfach. / 190 „ verkettet.

Type	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	
Notwendige Watt .	125	200	354	670	950	1730	2100	2950	4250	5500	8000	10400	15400	20300	30000	41000	60000	79000	Watt
Ampère pro Kreis ca.	0,6	1,6	1,7	3,2	4,5	8,0	10	14	17	26	38	50	74	92	130	175	265	335	Ampère
Pferdestärken . . .	1/16	1/8	1/4	1/2	3/4	1 1/2	2	3	4 1/2	6	9	12	18	25	36	50	75	100	PS
Wirkungsgrad . . .	40	46	52	55	58	64	70	75	78	80	83	84	86	87	88	90	92	93	%
Touren pro Minute .	2800	2800	2800	1400	1400	1400	1400	1400	1400	950	950	950	700	700	560	560	480	480	pro Min.
Riemenscheibe Durchmesser mm	50	50	70	120	120	140	140	160	160	250	250	250	300	350	400	550	650	650	mm
Riemenscheibe Breite „	30	30	60	60	60	80	80	100	100	140	140	160	200	240	350	400	450	500	mm
Gewicht in kg. . .	12,5	20	30	42	60	90	120	150	200	275	420	580	780	1050	1450	2000	2700	3600	kg

Tabelle VIII.

Zusammenstellung der elektrotechnischen Maafseinheiten und deren Dimensionen.

(Empfohlen vom internationalen Elektriker-Kongrefs in Chicago 1893. Vorgeschlagen von Prof. E. Hospitalier.)

Bezeichnung	Symbol	Praktische Einheit	Abgekürzte Bezeichnung der praktischen Einheit	Dimensions-Formel im absoluten Maafs-System	Abgekürzte Bezeichnung im absoluten Maafs-System	Beziehungs-Gleichung
I. Fundamental-Einheiten:						
Länge	L, l	Meter	m	L	cm	—
Masse	M	Kilogramm-Masse	kg	M	g	—
Zeit	T, t	1. Sekunde 2. Minute 3. Stunde	s, m, h	T	s	—
Fläche	S, s	Quadratmeter	m^2	L^2	cm^2	$S = L \cdot L$
Volumen	V	Kubikmeter	m^3	L^3	cm^3	$V = L \cdot L \cdot L$
Winkel	α, β	1. Grad 2. Minute 3. Sekunde	—	—	—	$\alpha = \frac{\text{Arc}}{\text{Radius}}$
Geschwindigkeit	v	Sekunden-Meter	m/s	$L\,T^{-1}$	cm/s	$v = \frac{L}{T}$
Winkelgeschwindigkeit	ω	Touren pro Min.	t/m	T^{-1}	—	$\omega = \frac{V}{L}$
Beschleunigung	a	Sek.-Meter pro Sek.	m/s^2	$L\,T^{-2}$	cm/s^2	$a = \frac{V}{T}$
Kraft	F, f	Gramm-Kilogramm-Kraft	g*) kg*)	$L\,M\,T^{-2}$	dyne	$F = M\,a$
Arbeit	W	Kilogramm-Meter	kgm	$L^2\,M\,T^{-2}$	erg	$W = F\,L$

Bezeichnung	Symbol	Praktische Einheit	Abgekürzte Bezeichnung der praktischen Einheit	Dimensions-Formel im absoluten Maafs-System	Abgekürzte Bezeichnung im absoluten Maafs-System	Beziehungs-Gleichung
Effekt	P	Sek.-Kilogramm-Meter	kgm/s	$L^2 M T^{-3}$	erg/s	$P = \frac{W}{T}$
Druck	p	kg pro cm²	kg/cm²	$L^{-1} M T^{-2}$	dyne/cm²	$p = \frac{F}{S}$
Trägheits-Moment	K	do.	kg/cm²	$L^2 M$	g/cm²	$K = M L^2$
II. Magnetische Gröfsen:						
Polstärke	m			$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$		$m = L \cdot \sqrt{F}$
Magnetisches Moment	$\mathfrak{M}$			$L^{5/2} M^{1/2} T^{-1}$		$\mathfrak{M} = m \cdot l$
Spezifischer Magnetismus Intensität der Magnetisierung	$\mathfrak{J}$			$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$		$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{M}}{V}$
Feldintensität (Felddichte)	$\mathfrak{H}$			$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$		$\mathfrak{H} = \frac{F}{m} = \frac{\Phi}{S}$
Magnetischer Kraftfluſs (Feld)	Φ			$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$		$\Phi = \mathfrak{H} \cdot S = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$
Magnetische Induktion	$\mathfrak{B}$			$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$		$\mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H}$
Magnetisierende Kraft	$\mathfrak{H}$	Ampère-Windungen		$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$		$\mathfrak{H} = \frac{4 \pi N J^{1})}{L}$
Magnetomotorische Kraft	$\mathfrak{F}$			$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-2}$		$\mathfrak{F} = 4 \mu N J^{1})$
Magnetischer Widerstand bezw. Reluktanz	$\mathfrak{R}$			L^{-1}		$\mathfrak{R} = \varrho \frac{L}{S}$
Magnetische Permeabilität	μ			—		$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$

[1]) N bedeutet die Zahl der Windungen, L die Länge der Elektromagnetspule, bezw. des Kraftlinienweges.

Magnetische Susceptibilität	k			—	$k = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$
Spezifischer, magnetischer Widerstand (Reluktivität)	ν			—	$\nu = \frac{l}{\mu}$

III. Elektromagnetische Größen:

Widerstand	R, r	Ohm	ohm	$L\,T^{-1}$	$R = \frac{E}{J}$
Elektromotorische Kraft	E, e	Volt	v	$L^{1/2}\,M^{1/2}\,T^{-2}$	$E = R\,J$
Potentialdifferenz	U, u	do.	V	$L^{1/2}\,M^{1/2}\,T^{-2}$	$U = R\,J$
Stromstärke	J, i	Ampère	A	$L^{1/2}\,M^{1/2}\,T^{-1}$	$J = \frac{E}{R}$
Quantität der Elektrizität	Q, q	Coulomb, Ampèrestunde	C, A-h	$L^{1/2}\,M^{1/2}$	$Q = J\,T$
Kapazität	C, c	Farad	F	$L^{-1}\,T^{2}$	$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{E}$
Elektrische Energie	W	Joule, Wattstunde	J, W-h	$L^{2}\,M\,T^{-2}$	$W = \frac{1}{2}\,U\,Q$
Elektrischer Effekt	P	Watt	W	$L^{2}\,M\,T^{-3}$	$P = U\,J = E\,J$
Spezifischer, elektrischer Widerstand	ϱ	Ohmcentimeter	ohm-cm	$L^{2}\,T^{-1}$	$\varrho = \frac{R\,S}{L}$
Leitungsfähigkeit	G	Mho	mho	$L^{-1}\,T$	$G = \frac{1}{R}$
Spezifische Leitungsfähigkeit	γ	Mhocentimeter	mho-cm	$L^{-2}\,T$	$\gamma = \frac{1}{\varrho}$
Induktionskoeffizient	L, l	Henry	H	L	$e = L\,\frac{i}{t}$

Tabelle IX.

Zusammenstellung der beim Wechselstrombetriebe vorkommenden Beziehungen der Konstanten.

J_{eff}, J_{max}, $M(J)$, $M(J^2)$ $\qquad$ E_{eff}, E_{max}, $M(E)$, $M(E^2)$

J und E sind Beziehungen auf die elektrodynamometrische Wirkung des Gleichstromes.

$$J_{eff} = \frac{J}{0{,}9} = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, J_{max} \qquad E_{eff} = \frac{E}{0{,}9} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, E_{max}$$

$$J_{max} = \frac{\pi}{2} M(J) = \sqrt{2}\sqrt{M(J^2)} \qquad E_{max} = \frac{\pi}{2} M(E) = \sqrt{2}\sqrt{M(E^2)}$$

$$M(J) = \frac{2}{\pi} J_{max} = 0{,}9003\sqrt{M(J^2)} \qquad M(E) = \frac{2}{\pi} E_{max} = 0{,}9\sqrt{M(E^2)}$$

$$\sqrt{M(J^2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} J_{max}. \qquad \sqrt{M(E^2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{max}.$$

Die einfachen und quadratischen Mittelwerte von E und J verhalten sich wie:

$$1 : \frac{2}{\pi} : \frac{1}{2}\sqrt{2} = 1 : 0{,}637 : 0{,}707 = 1{,}570 : 1 : 1{,}110.$$

Der „Formfaktor“ (siehe „The Electrician“ Januar 1896 und E. T. Z. vom 27. Februar 1896)

$$f = \frac{\text{Quadratwurzel aus mittl. Quadrat}}{\text{Mittelwert}}$$

der Ordinaten einer halben Welle.

$$f = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} y^2 \cdot dt : \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} y \cdot dt$$

(wobei y die Ordinate der Kurve, $\frac{T}{2}$ die halbe Wellenlänge bedeutet).

Druckfehler-Berichtigung.

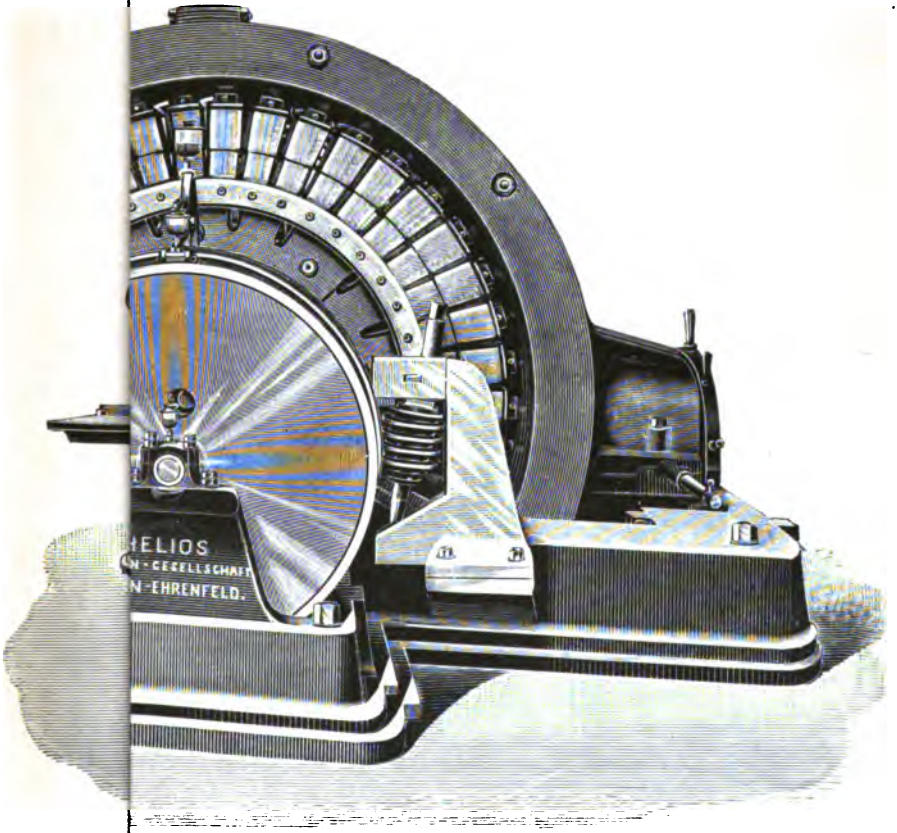
Seite 25. Formel 29 muss lauten:

$$J = \frac{J_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, J_m.$$

Seite 26. Zeile 24 von oben: $ei = EJ\sin\alpha \cdot \sin\beta$, statt $e = EJ\sin\alpha \cdot \sin\beta$.

Druck von Oskar Bonde in Altenburg.

Tafel I.



Druck von Oskar Bonde, Altenburg.

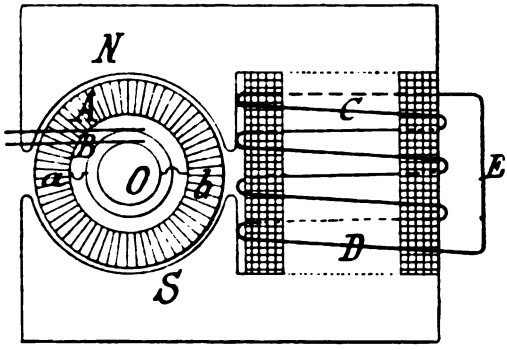


Fig. 5.

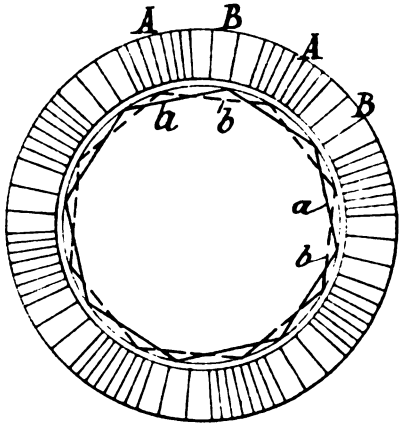


Fig. 6.

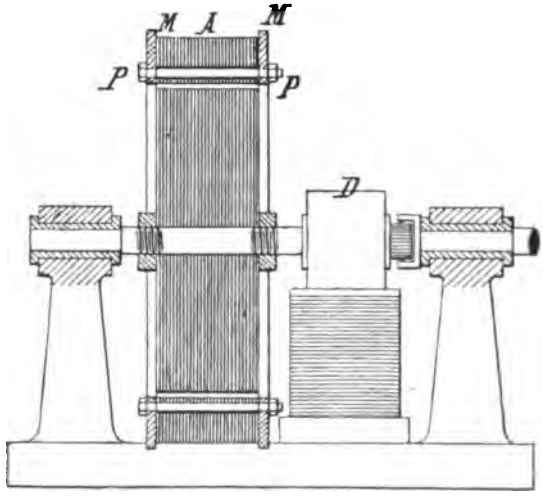


Fig. 8.

Druck von Oskar Bonde, Altenburg.

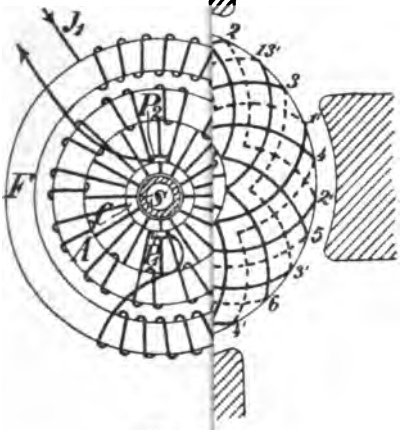


Fig. 1.

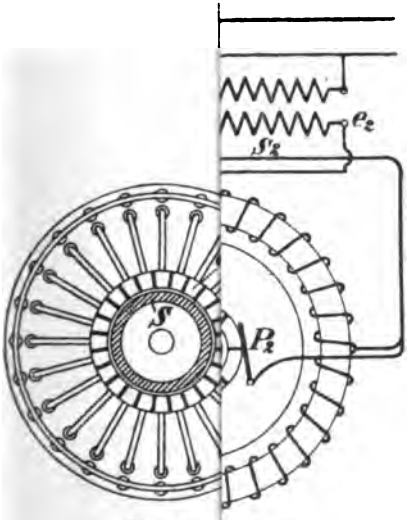


Fig. 5.

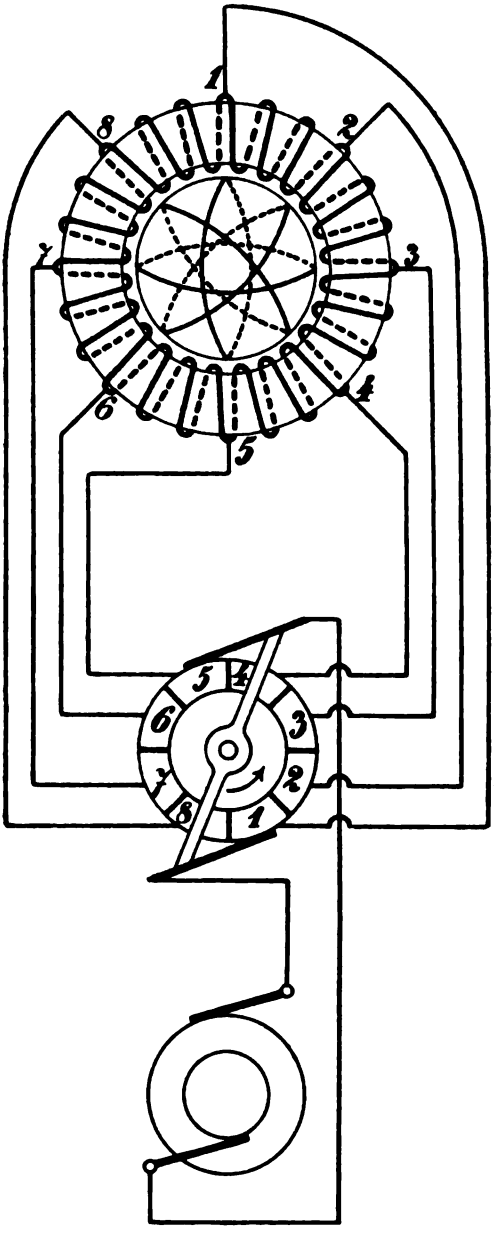


Fig. 9.

Hermann C

Druck von Oskar Bonde, Altenburg.

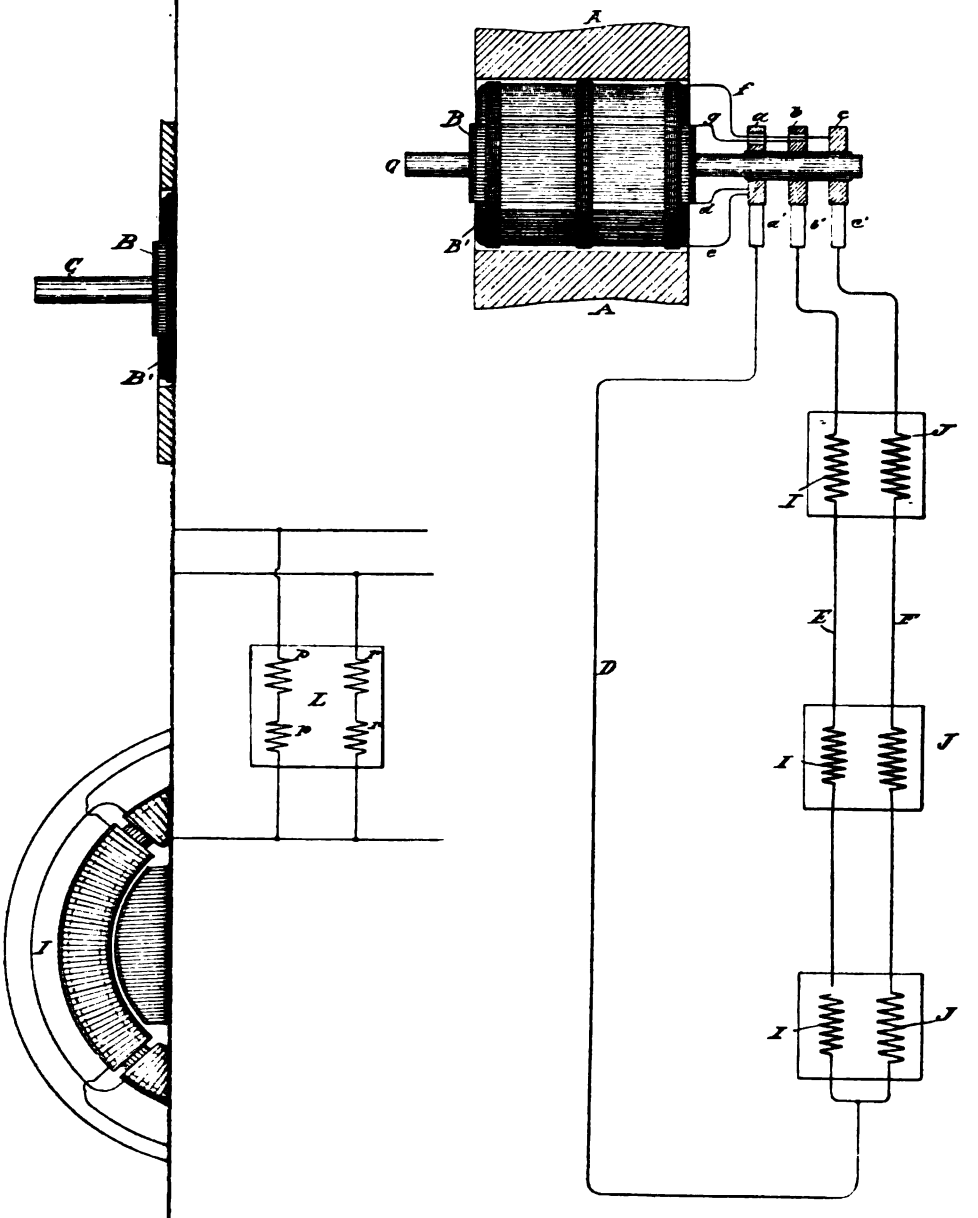
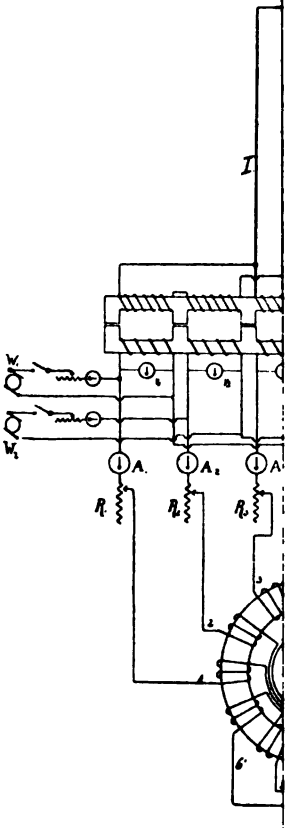


Fig. 2.

Druck von Oskar Bonde, Altenburg.



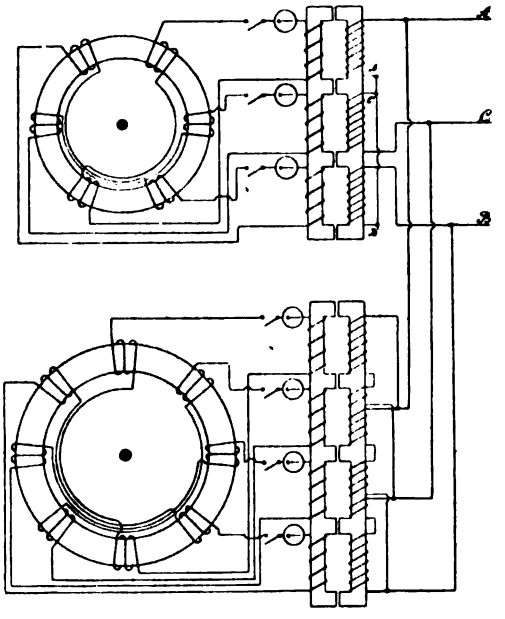


Fig. 2.

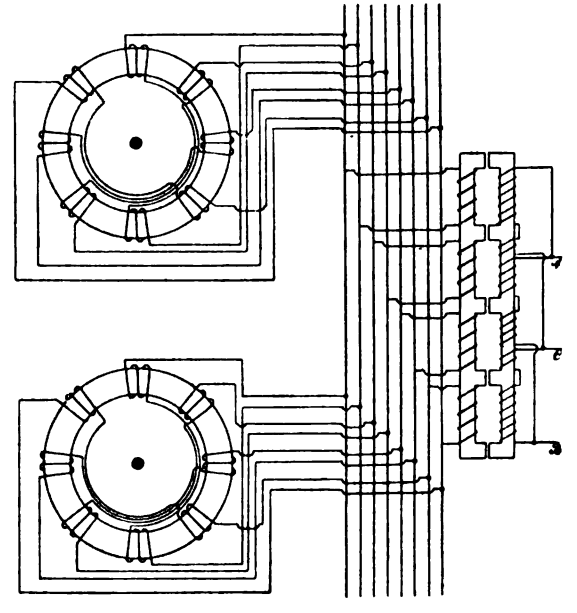


Fig. 3.

Hermann Costenoble, Ver

Druck von Oskar Bonde, Altenburg.

Tafel VI.

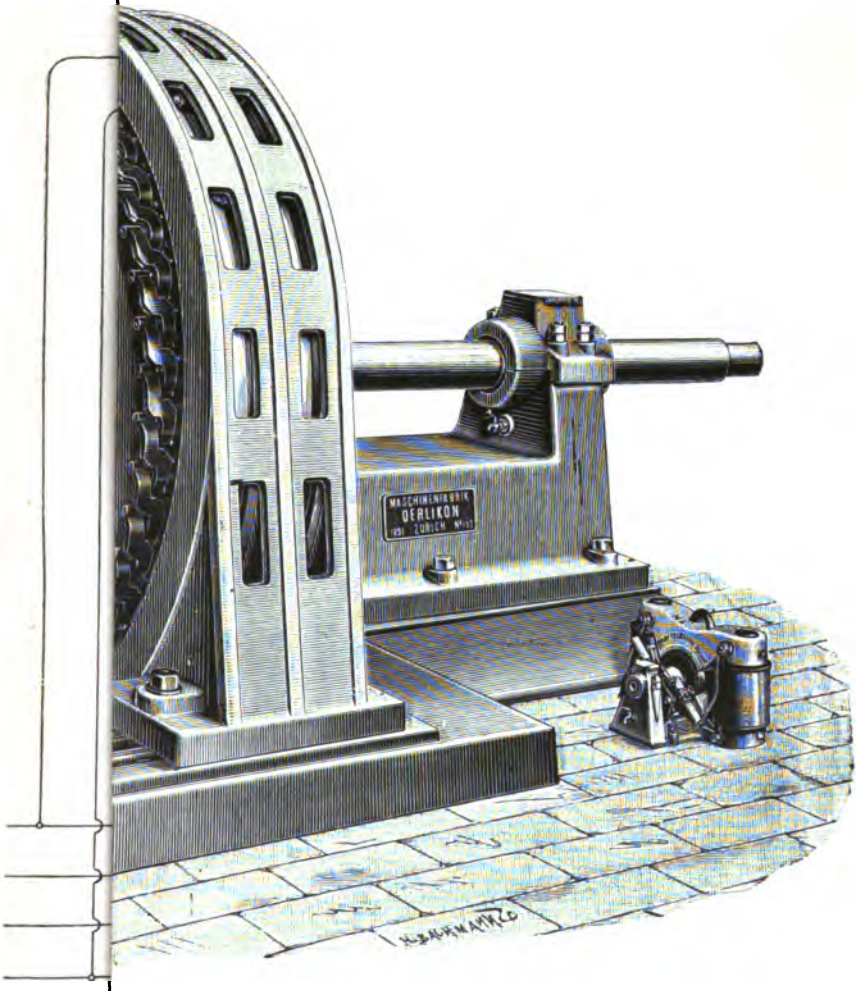
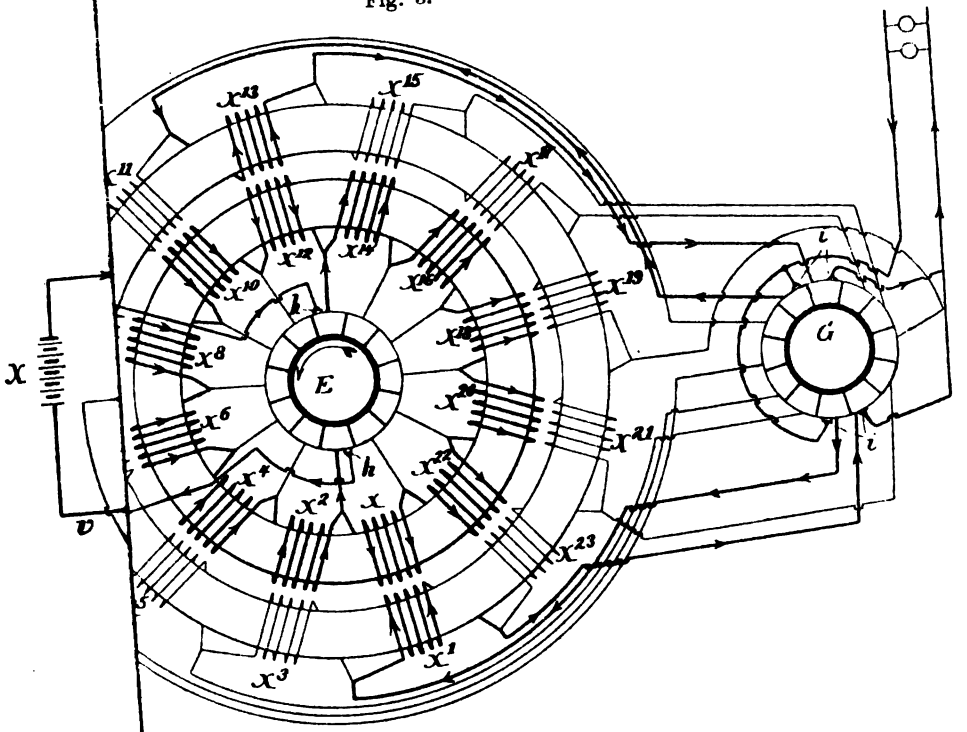


Fig. 2.

Druck von Oskar Bonde in Altenburg.

Fig. 3.



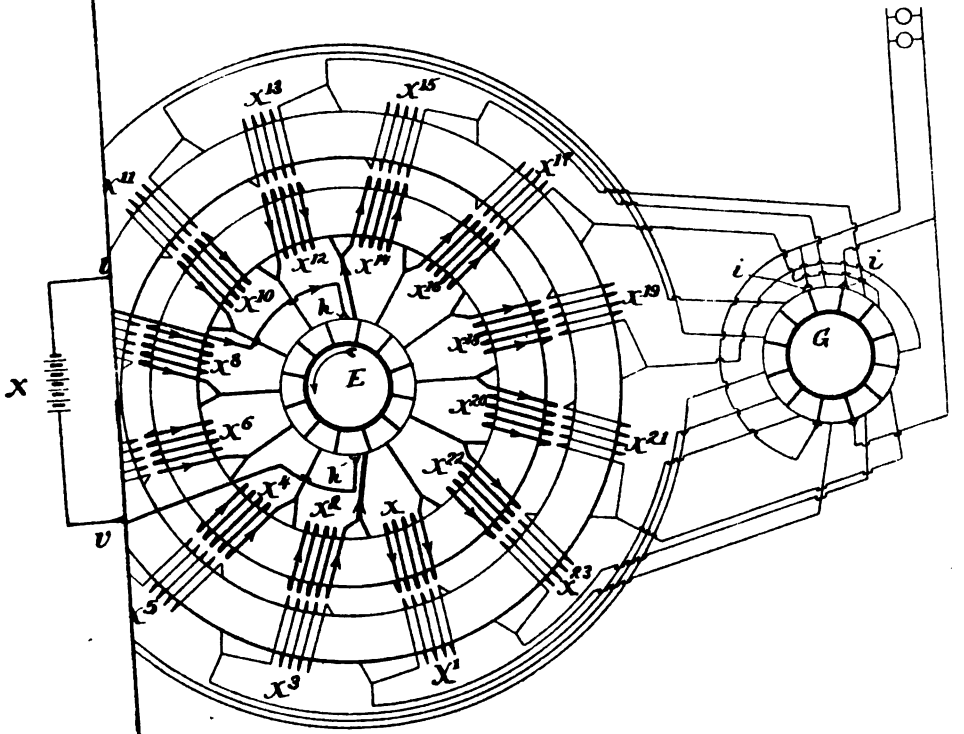
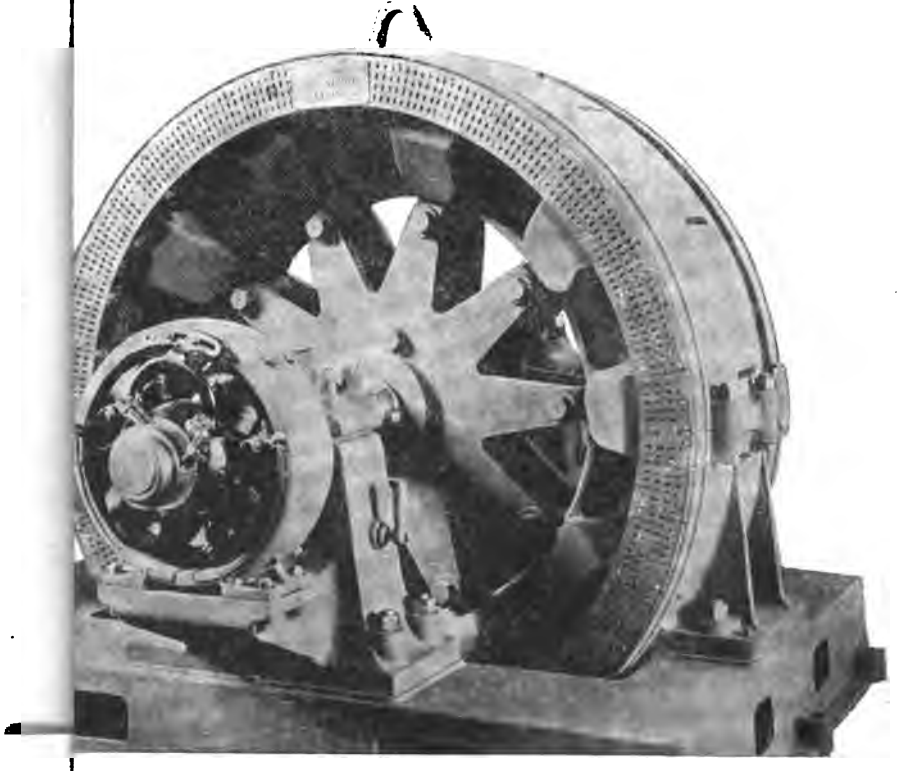


Fig. 4.

Druck von Oskar Bonde, Altenburg

Tafel VIII.



Hermann Coste

Druck von Oskar Bonde, Altenburg.